

Bakalářská práce

**Analýza praktického využití technologie řezání vodním
paprskem a laserem**

**The Analysis of the Practical Use of Water-jet and Laser
Cutting Technology**

Student:

Michal Němeček

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Sergej Hloch, PhD.

Ostrava 2020

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020


Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Michal Němeček

Adresa trvalého bydliště autora: Náklo 321, Náklo, Olomouc, 783 32

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Němeček**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Analýza praktického využití technologie řezání vodním paprskem a laserem**
The Analysis of the Practical Use of Waterjet and Laser Cutting Technology
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu problematiky.
2. Experimentální metodika a experimentální ověření.
3. Vyhodnocení naměřených dat.
4. Závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

VASILKO, K.; HRUBÝ, J.; LIPTÁK, J. *Technológia obrábania a montáže*. Bratislava : Alfa, 1991. 494 s. ISBN 80-05-00807-4.
VASILKO, K.; et al. *Nové materiály a technológie ich spracovania*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1990. 365 s. ISBN 80-05-00661-6.
HLOCH, S.; VALÍČEK, J. *Teoretické spracovanie a základný projekt prevádzkovej aplikácie automatizovaného riadenia technológie hydroabrazívneho delenia technických materiálov*. 1. vyd. Prešov : FVT TU, 2008. 77 s. ISBN 978-80-553-0133-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis studenta

Anotace Bakalářské práce

Němeček, M. *Analýza praktického využití technologie řezání vodním paprskem a laserem*. VŠB – TU Ostrava, 65 s. Bakalářská práce, Ostrava, 2020. Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá využitím progresivních nekonvenčních technologií jako náhrady stávajícího postupu výroby typové součástky z výrobního portfolia společnosti AŽD Praha s.r.o. Jako řešení byla pro výrobu navržena technologie vysokotlakého abrazivního vodního paprsku a technologie výkonového laserového systému. Použití těchto technologií přináší zvýšenou produktivitu práce, vyšší kvalitu opracování, ekologickou nenáročnost a náhradu klasických metod třískového obrábění. V teoretické části práce je uvedena analýza současného stavu včetně charakteristiky vybraných technologií a jejich použití ve strojírenství. V praktické části práce je popsána stávající výroba typové součástí a v návaznosti na to navržena nová technologie výroby. V souvislosti se zvolenou technologií dělení a navrženými parametry bylo provedeno hodnocení dosažené kvality vyrobených součástí, a to z hlediska tvarové a rozměrové přesnosti, vizuálního hodnocení povrchu a výskytu vad a měření drsnosti povrchu. Závěrem práce bylo provedeno technickoekonomické zhodnocení a doporučení vhodné technologie pro výrobu typové součásti ve společnosti AŽD Praha s.r.o.

Klíčová slova

Vodní paprsek, laserová technologie, proces řezání, hodnocení kvality, drsnost povrchu

Annotation

Němeček, M. *The Analys of the Practical Use of WaterJet and Laser Cutting Technology*. VŠB – TU Ostrava, 65 p. Bachelor thesis, 2020. Supervisor: Petru, J.

The bachelor thesis deals with using of progressive non-conventional technologies as a substitution for the current production of a standard component from a production portfolio of company AŽD Praha Ltd. High-pressure abrasive water jet technology and laser technology were suggested as a solution to the production. The use of these technologies brings increased productivity, higher quality of machining, eco-friendly, and substitution of conventional methods of machining. In a theoretical part, the analysis of the current state is described including characteristics of selected technologies and their use in Mechanical Engineering. The current state of the production of standard components is described in a practical part of this thesis and new technology of production was proposed accordingly. In connection with selected technology and designed parameters, the evaluation of the achieved quality of produced components was realized, from the point of view a shape and dimensional accuracy, visual evaluation of surface and presence of defects, and the measurement of surface roughness. In the end of the bachelor thesis technical-economics evaluation was made and a recommendation of suitable technology for the production of these standard components in company AŽD Praha, Ltd.

Key words

Water jet machining; laser technology; cutting process; evaluation of the surface quality; surface roughness.

Obsah

Úvod.....	11
1 Analýza současného stavu	13
2 Technologie vodního paprsku	15
2.1 Historie vodního paprsku	16
2.2 Popis zařízení pro řezání vodním paprskem.....	18
2.2.1 Vysokotlaké čerpallo	19
2.2.2 Systém vysokotlakého potrubí.....	20
2.2.3 Řezací hlava	21
2.2.4 Vodní a abrazivní tryska.....	22
2.2.5 Pracovní plocha a lapač vody	23
2.2.6 Abrazivní médium	23
2.3 Princip řezání vodním paprskem	24
2.4 Vady při dělení vodním paprskem	28
2.5 Použití technologie vodního paprsku.....	29
3 Laserová technologie	31
3.1 Laser a jeho princip.....	31
3.2 Historie laserového záření.....	32
3.3 Konstrukce laserového zařízení a jejich rozdělení	34
3.4 Proces řezání pomocí laserové technologie.....	37
3.5 Využití laseru v praxi, jeho výhody a nevýhody	39
4 Praktická část práce	41
4.1 Představení typové součástky výroby	41
4.2 Stávající proces výroby	43
4.3 Návrh nové technologie výroby	44
4.4 Hodnocení kvality řezu po dělení materiálu	48
4.5 Technicko-ekonomické zhodnocení	55
5 Závěr.....	56

6	Seznam použitých obrázků	58
7	Seznam použitých tabulek	59
8	Literatura	61

Seznam použitých zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
ASJ	pulzní vodní paprsek	[-]
AWJ	abrazivní vodní paprsek	[-]
A ₅	tažnost	[%]
CAD	počítačová podpora programování	[-]
CAM	počítačem podporovaná výroba	[-]
CNC	computer numerical control	[-]
ČSN EN ISO	mezinárodní norma	[-]
D	deviační úhel	[°]
DIN	německý ústav pro průmyslovou normalizaci	[-]
DWJ	dynamic water jet	[-]
E ₁	základní energetická hladina	[J]
E ₂	základní energetická hladina	[J]
ΔE	rozdíl mezi energetickými hladinami	[J]
KV ⁻²⁰	nárazová práce	[J]
MESH	mezinárodní jednotka zrnitosti abrazivních materiálů	[-]
NASA	národní letecká a kosmická správa	[-]
NC	číslicově řízený program	[-]
Nd:YAG	ytrium-aluminium-granátu, dopovaný neodymem	[-]
P	tak vody	[MPa]
Q1-Q5	kvalitativní stupně	[-]
R _a	průměrná aritmetická úchylka	[μm]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
S _a	průměrná aritmetická výška posuzované plochy	[μm]

S_z	největší výška posuzované plochy	$[\mu\text{m}]$
TOO	tepelně ovlivněná oblast	$[\mu\text{m}]$
W	práce	$[\text{J}]$
WJM	obrábění vodním paprskem	$[-]$
Yret	zpožděná řezná stopa	$[\text{mm}]$
3D	trojrozměrný obraz	$[-]$
2D	dvourozměrná podpora projektování	$[-]$
λ	vlnová délka	$[\text{m}]$

Úvod

V dnešní době se na trhu vyskytuje nepřehledné množství moderních výrobních technologií. Tyto technologie jsou určeny zejména pro prvovýrobu součástí a komponent z různých druhů materiálů, různých tvarů a rozměrů. V souvislosti s tím, se v oblasti strojírenské výroby stále častěji vyskytují výrobky ze speciálních materiálů, které jsou hůře obrobitelné nebo výrobky, které mají specifický tvar (tvarově složité) nebo velké rozměry. Z hlediska jejich správné funkce a použití musí být vhodně navržena technologie jejich výroby, dodrženy předepsané technologické postupy, splněny vysoké požadavky na kvalitu a produktivitu opracování. V současnosti však neexistuje ideální technologie nebo metoda opracování, pomocí které by se podařilo naplnit všechny zmíněné ukazatele najednou. Proto je při návrhu vhodné technologie výroby součástí snaha najít kompromis nebo se ideálnímu stavu alespoň přiblížit.

Jedním z nejrozšířenějších odvětví ve strojírenské výrobě je dělení materiálů. Tato technologie výroby zahrnuje veškeré procesy, při nichž dochází k oddělování (rozpojování) materiálů vlivem mechanických a fyzikálních účinků. Nejčastěji se jedná o tři hlavní postupy, a to stříhání, sekání a řezání. Výsledkem těchto postupů je již téměř hotová součást bez nutnosti dalšího opracování nebo polotovaru určený pro další zpracování. Tato bakalářská práce bude zaměřena na proces řezání materiálů pomocí zvolených nekonvenčních technologií laseru a vodního paprsku.

S ohledem na současné požadavky trhu vyrábět produkty s vysokou kvalitou a produktivitou práce, jsou výrobci nuceni investovat do moderních výrobních technologií a jejich použití. Toto je příčinou toho, že v posledních letech dochází k rychlému rozvoji nekonvenčních technologií obrábění ve strojírenství. Význam slova nekonvenční znamená neobvyklý a oproti konvenčním (tradičním) způsobům obrábění zde při opracování materiálů nedochází ke tvorbě třísky. Namísto toho je obráběný materiál z místa řezu odstraňován pomocí různých fyzikálních principů, jako jsou tepelné, chemické, elektrochemické ale i mechanické účinky (abrazivní vodní paprsek). Využitím těchto technologií dochází ke zvýšení produktivity opracování a při správně

zvolených parametrech i požadované kvalitě vyrobených součástí. Zvyšující se poptávka po opracování a dostupné ceny na pořízení nekonvenčních technologií jsou příčinou toho, že se tyto technologie dnes objevují už i v menších a středních výrobních podnicích.

Při zpracování bakalářské práce se bude vycházet z úzké spolupráce se společností AŽD Praha s.r.o. se sídlem v Praze, výrobním závodem v Olomouci. Tato společnost zakoupila technologii vodního paprsku před více než dvěma roky od společnosti Flow International Corporation. Technologie vodního paprsku je ve výrobě oproti ostatním běžným technologiím opravdu krátce, čemuž nasvědčuje doba, po kterou je zařízení v provozu. V běžném provozu se toto zařízení používá pro výrobu tvarově složitých součástí o tloušťce materiálu až 80 mm. Avšak snahou společnosti je zjistit, jak lze komplexně a hlavně efektivně tuto technologii vysokotlakého vodního paprsku využít napříč svými výrobními podmínkami.

1 Analýza současného stavu

Cílem bakalářské práce je navrhnout vhodnou technologii a experimentálně ověřit nebo zdokonalit parametry procesu řezání, které budou mít stěžejní vliv na kvalitu vyráběných součástí. Výstupy této práce budou přínosné nejen pro zadavatele společnost AŽD Praha s.r.o. ale i pro její koncové zákazníky.

Současná situace a trend výroby ve strojírenství zvyšuje poptávku po výrobě přesných a tvarově složitých součástí. V důsledku vzrůstající konkurenceschopnosti jsou kladeny stále vyšší požadavky na produktivitu výroby a kvalitu součástí. Toto se týká především kusové a malosériové výroby, kde je rychlost, pružnost a schopnost reagovat na nové výzvy velmi důležitá. Avšak vlivem nedostatečných znalostí o využití nekonvenčních technologií dochází často k řadě problémů s jejich zavedením do stávajících výrobních procesů. Toto je často příčinou zvyšování nákladů na výrobu součástí, ztrátě produktivity, vzniku ekonomických ztrát apod. Z tohoto důvodu je znalost technologie a jejich základních principů podstatná, protože při špatně zvolené technologii, nevhodně nastavených procesních parametrech, neznalosti chování obráběného materiálu aj., může dojít při procesu řezání materiálu ke vzniku řady komplikací. Ty se nejčastěji projevují nesouladem rozměrové a tvarové přesnosti s předepsanými hodnotami ve výkresové dokumentaci, nadměrným výskytem defektů, poškozením součástí a rostoucím počtem zmetkových kusů.

Cestou, jak lze tomuto alespoň částečně předejít, je snaha neustále optimalizovat a inovovat výrobní postupy. Jako nejjednodušší způsob se nabízí optimalizace procesních parametrů a jejich nastavení na základě hodnocení dosažené kvality řezu a technickoekonomického zhodnocení. Hodnocení dosažené kvality vyráběných součástí může být po aplikaci vybraných technologií realizováno z pohledu vybraných parametrů integrity povrchu (např. drsnost povrchu) nebo také z hlediska dosažené tvarové a rozměrové přesnosti nebo výskytu vad vznikajících v průběhu procesu řezání.

Porovnání obou technologií vodního paprsku a laseru lze však provést pouze tehdy, pokud existuje u obou použitých technologií nějaký referenční bod, který je

společný pro obě technologie. Fyzikální podstata zvolených technologií je totiž naprosto odlišná. Řezání pomocí vodního paprsku je založeno na mechanickém úběru materiálu – erozi. Naopak technologie laserového řezání je založena na použití kvantových jevů, při nichž dochází k vypařování obráběného materiálu. Z tohoto důvodu se pro porovnání obou technologií jeví dosažená kvalita obrobených součástí a technickoekonomické zhodnocení procesu řezání jako nejvhodnější. (J. Řasa, 2007)

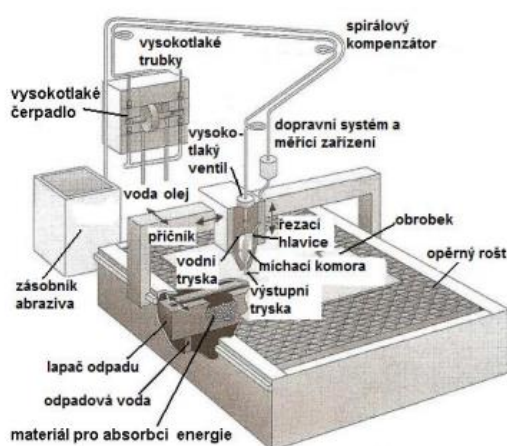
2 Technologie vodního paprsku

Technologie vodního paprsku je jednou z nekonvenčních metod obrábění. Jedná se o velmi progresivní technologii se širokou oblastí využití. Tato technologie může pro obrábění využívat pouze čistou vodu (WJM – Water Jet Machining) nebo se do vysokorychlostního proudu vody přidává abrazivum (AWJ – Abrasive Water Jet). Další možností je technologie suspenzního vodního paprsku (ASJ – Abrasive Suspension Jet), která se liší způsobem přimíchávání abraziva do vodního paprsku. Princip řezání metodou WJM spočívá ve využití kinetické energie vysokotlakého a vysokorychlostního vodního paprsku. Rychlost kapaliny (čisté vody) dosahuje až trojnásobku rychlosti zvuku, což představuje obrovskou kinetickou energii, která je při dopadu přeměněna na tlakovou energii působící na materiál. Vlivem tohoto působení dochází k odstraňování částic řezaného materiálu a jeho postupné destrukci. (K. Vasilko, J. Hrubý, J. Lipták, 1991, D. Klichová, 2017)

Při použití abraziva (metoda AWJ) se kombinuje kinetická energie kapaliny a kinetická energie abrazivních částic, čímž se zvyšují mechanické účinky (abrazivní otěr) působící na dělený materiál. Abrazivní vodní paprsek pracuje na základě vysokého tlaku vody a mechanické práce abrazivních částic, které jsou unášeny proudem vody jako nosného médium. Kapalina bez či s přidaným abrazivem je usměrňována do úzkého paprsku a díky kombinaci vysoké rychlosti a vysoké kinetické energie dokáže technologie vodního paprsku řezat téměř všechny druhy materiálů bez ohledu na jejich mechanické a fyzikální vlastnosti (přírodní materiály, plasty, kovové materiály, kompozitní materiály, slitiny a tvrdokovy). Dělení materiálů se tedy provádí jako obrušování materiálu vysokým tlakem vodního paprsku. Zdrojem tlaku jsou speciální tlaková čerpadla, která mohou mít příkon 9 – 75 kW a průtok vody 1,2 – 7,5 dm³·min⁻¹. V závislosti na druhu děleného materiálu se pracovní tlak nastavuje od 60 MPa do 600 MPa. Paprsek vody prochází přes dýzu, která je svou geometrií a konstrukcí upravena tak, aby zajistila velmi tenký paprsek vody od 0,1 až po 1,5 mm

s co nejvyšší kinetickou energií. Rychlost takového paprsku vody může být až 900 m.s^{-1} . (K. Vasilko, J. Hrubý, J. Lipták, 1991, D. Klichová, 2017)

Jak už bylo zmíněno, technologie vodního paprsku má široké uplatnění. Je to univerzální metoda, která umožňuje řezat, soustružit, frézovat, upravovat povrch materiálu aj. S ohledem na ostatní technologie, které také umožňují dělit nebo obrábět materiály, má technologie AWJ řadu výhod. Oproti ostatním konvenčním i nekonvenčním technologiím nevzniká při obrábění materiálu velké množství tepla, které by způsobilo vznik tepelně ovlivněné oblasti. Při dělení materiálu pomocí technologie AWJ dochází k odstraňování materiálu vlivem mechanického úběru pomocí velmi malých abrazivních zrn. Nedochází tedy ke vzniku klasických třísek jako u konvenčních metod třískového obrábění. Díky tomu jsou řezné síly, které vznikají při procesu obrábění, v porovnání s klasickými třískovými metodami, několikanásobně nižší. Obráběný materiál se tak téměř nedeformuje a nedochází ke vzniku zbytkových napětí. Další nespornou výhodou je, že tato technologie je naprosto bezprašná a umožňuje obrábět materiály, které jsou i zdraví škodlivé. (D. Klichova, 2017 M. Sadílek, 2009)



Obrázek 1: Technologie vodního paprsku
Zdroj: R. Brym, 2008

2.1 Historie vodního paprsku

Z historického hlediska první člověk, který začal využívat vysokého tlaku vody k dělení materiálu, byl v 50. a 60. letech minulého století Dr. Norman Franz, který položil

základy vysokorychlostního vodního paprsku a využíval ho především pro řezání objemných kmenů stromů a pro dělení dřeva ke stavebním účelům. Dr. Norman Franz také dokázal, že velmi tenký paprsek vody při výtoku z trysky dosahuje velké rychlosti a je tak schopný řezat i další materiály mimo dřeva. (M. Sadílek, 2016, str. 79). Avšak první zmínky o použití vodního proudu spadají již do středověku. V této době se voda a vodní proud používaly účelově k vymílání a odplavování hornin při těžbě zlata a dalších minerálů. S rozvojem čerpací techniky na přelomu 19. a 20. století byla následně vyvinuta zařízení vhodná pro použití v dolech. Tato zařízení však pracovala pouze s velmi malými tlaky v porovnání s dnešními moderními zařízeními. Až v roce 1936 se začala technologie vodního paprsku využívat pro těžbu uhlí v Rusku, odkud se následně rozšířila i do ostatních zemí. Další rozvoj technologie vodního paprsku byl spojen s vývojem nového zařízení, které umožňovalo kontinuální proud vody o vysokém tlaku. Předchozí zařízení, které používal Dr. Norman Franz, nebyla schopna zajistit nepřetržitý proud vody, který by zajišťoval plynulost řezání. (Vodnipaprsek.com, 2020)

Až společnost Ingersoll Rand (USA) na konci 60. let vyvinula koncept zařízení se systémem umožňujícím kontinuální řezání vodním proudem při tlacích 200 MPa až 400 MPa. V této době dostupná zařízení umožňovala řezání pouze měkkých materiálů, jako je papír, plast a dřevo. O 10 let později se vysokorychlostní vodní paprsek stal běžným nástrojem napříč průmyslovým odvětvím. Výzkum a vývoj se v této době zaměřil na rozvoj technologie, a to na přidání různých přísad do proudu vody nebo zlepšování konstrukce vodní trysky. V návaznosti na to se koncem sedmdesátých let Dr. Mohamed Hashish zabýval možnostmi, jak zvýšit efektivnost vodního paprsku, která vedla k možnosti řezat kovy a jiné tvrdé materiály. Zkoumáním došel k výsledku, že při použití abrazivního materiálu v paprsku se výrazně zvýší možnost řezat tyto tvrdé materiály, jako byl kámen, sklo nebo kov. Po mnoha provedených experimentech se rozhodl použít minerál granát. Avšak k většímu rozvoji této technologie došlo již o něco dříve. Mezi roky 1971 a 1974 byl zahájen výzkum technologie vodního paprsku ve společnosti NASA (Americká organizace pro letectví a kosmonautiku). Tento výzkum

směřoval k vyřešení technického problému s opracováním keramických desek, které se v té době používaly jako obklady raketoplánů. (D. Klichova, 2017, Z. Krajný, 1998)

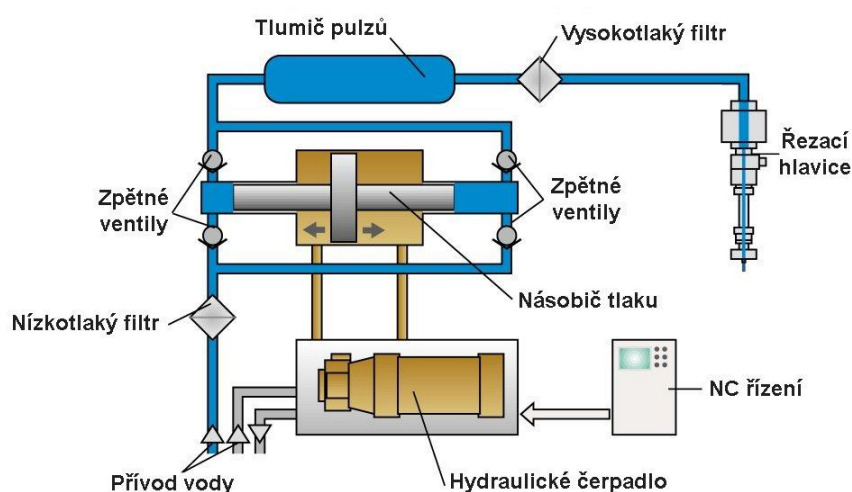
Následující kroky ve vývoji technologie vedly až do současnosti, kdy vodní paprsek představuje universální nástroj a jeho využití zahrnuje široké spektrum aplikací, a to nejen ve strojírenství.

2.2 Popis zařízení pro řezání vodním paprskem

Při procesu řezání je nutné stlačit vodu vysokým tlakem (až 700 MPa). Obecně platí, že čím větší tlak, tím se zvýší produktivita procesu a zefektivní se řezání. To však sebou přináší vyšší technické požadavky na celý systém. Proto se dnes běžně používají tlaky okolo 400 MPa. (J. Foldyna, 2013)

Takto vysokých tlaků lze dosáhnout pomocí speciálních čerpadel – multiplikátorů v hydraulické jednotce. Odtud putuje voda systémem vysokotlakého potrubí do akumulátoru tlaku, který tlumí rázy vzniklé střídavým stlačováním vody. Voda dále putuje přes sadu filtrů do řezací hlavy, kde se formuje tvar paprsku a podtlakem se přimíchává abrazivní médium. Tato směs pod vysokým tlakem proudí výstupní tryskou a dopadá na povrch obráběného materiálu. (Mmspektrum.com, 2014)

Konstrukce strojů pro obrábění vodním paprskem mohou být různé, od robustních až po kompaktní zařízení. Toto se odvíjí od velikosti pracovní plochy pro ustavení obráběného materiálu. (Mmspektrum.com, 2014) Na obr. 2 lze vidět jednotlivé části zařízení a jejich zapojení.



Obrázek 2: Jednotlivé části zařízení a jejich zapojení
Zdroj: R. Brym, 2008

2.2.1 Vysokotlaké čerpadlo

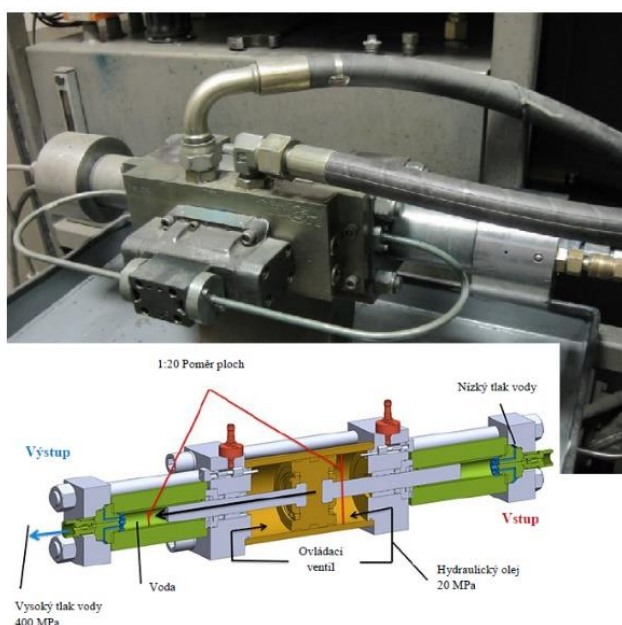
Proces řezání a účinek vodního paprsku na obráběný materiál se odvíjí od tlaku kapaliny a velikosti kinetické energie, která působí na dopadovou plochu. Úkolem vysokotlakého čerpadla je generování stlačené kapaliny s konstantní hodnotou tlaku. Jak již bylo uvedeno výše, čím vyšší tlak kapaliny, tím vyšší je kinetická energie, ale rostou i nároky na součásti systému čerpadla. Z tohoto důvodu se pro zajištění bezpečnosti čerpadla umísťují v oddělených místnostech. Pro technologii AWJ se používají dva typy systémů:

- **plunžrové čerpadlo,**
- **multiplikátorové čerpadlo.** (mve.energetika.cz, 2020)

Plunžrové čerpadlo pracuje s tlakem kapaliny do 400 MPa a pro svou účinnost a jednoduchost se stalo nejčastěji používaným zařízením pro běžné průmyslové aplikace, jako je například čištění, oplachování, odstraňování nečistot, ale je možné ho využít i pro řezání. Plunžrové čerpadlo pracuje na principu postupného zvyšování tlaku vody v jednotlivých válcích. Tento typ čerpadla obsahuje obvykle tři až pět válců, v nichž se pohybují plunžry (písty) vlivem otáčení klikové hřídele. (Z. Krajný, 1998)

Multiplikátorové čerpadlo pracuje s tlaky v rozmezí 400 MPa až 600 MPa. Existují však i speciální zařízení, u kterých je dosahováno tlaku vody až 1000 MPa. Činnost multiplikátorového čerpadla (násobiče tlaku) je založena na Pascalově zákoně. Platí, že

výstupní tlak je tolikrát větší, kolikrát je plocha pístu menší než plocha druhého pístu. Jedná se tedy o rovnováhu sil, působících na nestejně plochy pevně spojených pístů (rozdíl pracovních ploch vysokotlakého a nízkotlakého pístu). Běžně dosahovaný poměr je 20:1. Regulace výstupního tlaku probíhá tedy změnou tlaku vstupního (tlak oleje 15 až 30 MPa). Ten je do multiplikátoru dopravován pomocí hydraulického čerpadla. Obecně je průtok vody u multiplikátorového čerpadla nižší, dosahuje několika litrů za minutu. Kdežto u plunžrového čerpadla je to až několik desítek nebo stovek litrů za minutu. Z důvodu zajištění konstantního výstupu vysokotlaké vody z multiplikátoru, musí být za ním zařazen akumulátor pro tlumení pulzů, který zajišťuje rovnoměrnou dodávku vody. (Z. Krajný, 1998)



Obrázek 3: Multiplikátor a jeho schéma
Zdroj: WARDJET.COM, 2020

2.2.2 Systém vysokotlakého potrubí

Na rozvody vysokotlaké vody jsou kladeny vysoké technické požadavky (výroba z nerezových ocelí a velmi pevných materiálů). Při technologii vodního paprsku může malá vada v rozvodech způsobit netěsnost, která může vyústit až v havárii. Běžně jsou součásti pro vysokotlaké rozvody (armatury, trubky) standardizované a normalizované. Pomocí těchto rozvodů je vysokotlaká kapalina dopravována již do zmíněného

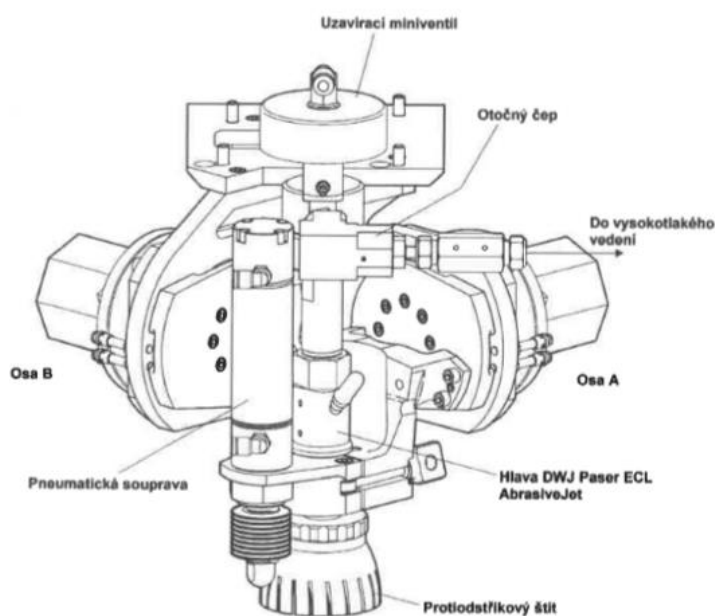
akumulátoru, kde se vyruší kolísání vody z multiplikátoru. Dále se voda přivádí pomocí vysokotlakých tlustostěnných trubek k polohovací jednotce, ke které je připevněna řezací hlava. Systém rozvodů zahrnuje také dvě sady filtrů, přes které je voda filtrována. Jeden filtr se nachází v nízkotlakém systému (před multiplikátorem) a druhý ve vysokotlakém okruhu (za multiplikátorem). Oba filtry slouží pro zachytávání nečistot o velikosti od 0,5 do 1,2 μm . (Z. Krajný, 2001)



*Obrázek 4: Vysokotlaké potrubí
Zdroj: KCCCONTROLS.CO.UK, 2020*

2.2.3 Řezací hlava

V řezací hlavě je dosažen výsledný tvar paprsku. V její první části je umístěna vodní tryska. Při průchodu kapaliny tryskou dochází ke změně potenciální energie stlačené kapaliny na kinetickou energii paprsku. Pomocí trysky je paprsek usměrňován, čímž je vytvořen kompaktní proud stlačené kapaliny, který tvoří základ řezného nástroje. U technologie abrazivního vodního paprsku dochází v řezací hlavě ke smíchávání vody a abrazivního média, viz obr. 5. Pro tyto účely slouží v řezací hlavě směšovací komora. V tomto místě se do vodního paprsku přimíchává abrazivní médium, které je dopravováno potrubím dávkovače ze zásobníku abraziva. K procesu přimíchávání abraziva do vodního paprsku dochází vlivem podtlaku, který vzniká částečným vířením kapaliny v rozšířené části směšovací komory. Při kontaktu s vodou dochází k rovnoměrnému rozptýlení abraziva v proudě kapaliny. Pomocí tohoto proudu dochází ke strhávání abraziva dále jeho urychlování a usměrňování. (O. Híreš, M. Hatala, S. Hloch, 2007)



Obrázek 5: Řezací hlava DWJ
Zdroj: Příručka – Jak mít úspěch s DWJ, 2005

2.2.4 Vodní a abrazivní tryska

Pomocí vodní trysky dochází tedy k přeměně vysokotlaké vody na vodní paprsek s rychlostí až 1400 m.s^{-1} . Od způsobu a kvality přeměny se dále odvíjí celková účinnost řezání. Výroba vodní trysky je velice komplikovaná, a to z důvodu dodržení přísných požadavků na souosost jednotlivých částí a drsnost povrchu vnitřního přívodu kapaliny. Životnost trysky závisí zejména na použitém materiálu a také na kvalitě upravené vody. Běžně se trysky vyrábějí z kovového materiálu (použití pro malé tlaky). Pro vyšší tlaky se používají trysky vyrobené z rubínu, safíru, nebo syntetického diamantu. Při řezání nastává opotřebení trysky nejčastěji vlivem malých nečistot nebo minerálů, které se usazují na povrchu trysky a zanášejí její otvor. Opotřebení trysky a nečistoty zvyšují tření a způsobují ztráty, které vznikají oteplováním pracovní kapaliny a jejím odpařováním. Životnost trysky se pohybuje řádově ve stovkách hodin, např. u safírové trysky je přibližně 200 hodin a diamantové trysky je až 10 krát větší. (Z. Krajný, 1998)

Po přidání abraziva do proudu vody ve směšovací komoře následuje průchod média abrazivní tryskou. Ta určuje konečný tvar paprsku, přičemž je vystavena

intenzivnímu opotřebení. V závislosti na použitém materiálu pro výrobu trysky, abrazivním materiálu a pracovním tlaku, se životnost trysky pohybuje od několika až po desítky hodin. Většina abrazivních trysek je však vyráběna práškovou metalurgií z karbidu wolframu nebo kubického nitridu bóru. (Z. Krajný, 1998)



*Obrázek 6: Ukázka abrazivních trysek
Zdroj: PTV.CZ, 2020*

2.2.5 Pracovní plocha a lapač vody

Pracovní plochu stroje vodního paprsku tvoří souřadnicový stůl. Ten se skládá z roštů, na které se pokládají obrobky, a z nádrže s vodou (lapač vody), která zachytává přebytečnou energii paprsku. Tato nádrž bývá obvykle 500 mm hluboká a z důvodu rozptýlení zbylé energie paprsku se na její dno pokládají předměty různých tvarů. Součástí nádrže je také odkalovací kaskáda, kde se z kalné vody usazují zbytky abraziva a částic obráběného materiálu. Usazený kal se odváží jako odpad nebo se část abraziva recykluje pro další použití. (A. Gokhan, 2015)

2.2.6 Abrazivní médium

Pro technologii AWJ se může použít buď abrazivo ve formě prášku nebo se mohou použít mikročástice křemičitého písku, drobných syntetických granulátů, ocelových kuliček nebo drtě. Mohou být tedy přírodní nebo uměle vyrobená. Abrazivo je do vysokotlakého proudu vody přiváděno pomocí tzv. abrazivní řezací trubice a používá se pro zvýšení řezacího výkonu vodního paprsku. Nejdůležitějšími parametry abraziva jsou: *řezný výkon, zrnitost, minimální vliv na opotřebení dýzy, na pracovní a životní prostředí*. Zrnitost abraziva označována jako „mesh“ je parametr, podle kterého se

posuzuje vhodnost daného abraziva. Doporučená zrnitost se pohybuje v rozmezí od 80 – 120, a znamená to počet ok fiktivního síta na 1“, kterým abrazivo ještě propadne. Nejčastěji používaným abrazivem je granát, a to hlavně díky vysoké produktivitě řezání. Dále se pro řezání používají abraziva jako diamantový prach, olivín, smírek nebo křemičitý písek. (W. A. Momber, R. Kovacevic, 2012)



*Obrázek 7: Ukázka abrazivního média - Australský granát
Zdroj: PISKOVACKA, 2019*

2.3 Princip řezání vodním paprskem

U procesu řezání vodním paprskem dochází k dezintegraci obráběného materiálu silovým, napětovým a deformačním účinkem od vysokotlakého proudu vody, abrazivního média a vzduchu. Působením tohoto procesu vzniká dělicí řez (řezná spára) v materiálu, na jejíchž stěnách je vytvořen reliéf, viz obr. 8. U technologie AWJ vzniká tento reliéf v důsledku mechanismu tvárné a křehké eroze obráběného materiálu. Tyto mechanismy působí společně a během procesu se mění v závislosti na čase (velikost posuvové rychlosti) a tloušťce řezaného materiálu. (D. Klichova, 2017). Dezintegraci materiálu vlivem vodního paprsku a mechanismům vedoucích ke vzniku řezné spáry se věnovali autoři. (J. Foldyna, 2013)



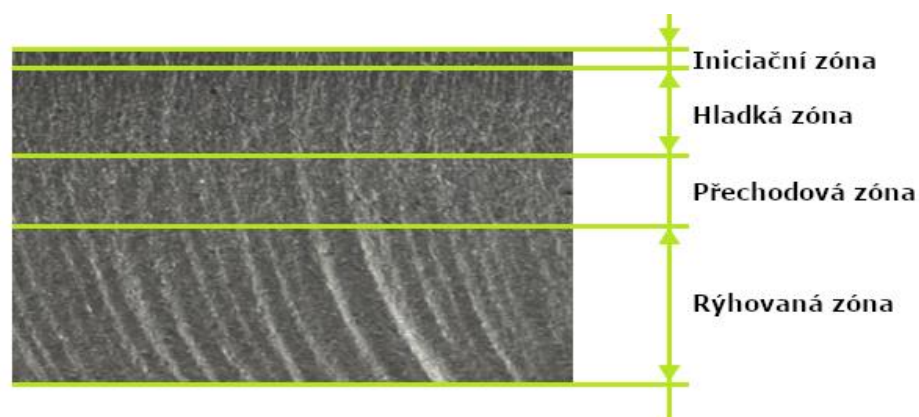
Obrázek 8: Řez vodním paprskem

Zdroj: ALSOUFI M. S., SUKER D. K., ALSABBAN A S. AZAM S, 2016

Současná problematika a vývoj technologie řezání vodním paprskem se zaměřuje na kvalitu řezu a hodnocení kvality povrchu po řezání. Podobná problematika již byla řešena v odborných publikacích: (D. Klichova, 2017, rezeni-cnc.cz, 2020). Rostoucí zájem o tuto problematiku vyplývá také ze zvyšujících se požadavků po finálním opracování obrobků bez nutnosti dalšího opracování. Nejčastěji se kvalita obrobene plochy posuzuje na základě ČSN EN ISO 4287 – Technická norma uvádějící geometrické požadavky na výrobky – strukturu povrchu, anebo z hlediska rozměrové a tvarové přesnosti. Proces řezání vodním paprskem ovlivňuje řada faktorů, a to jak přímých (technologické), tak nepřímých (hydraulické, směšovací, abrazivní). Působením těchto faktorů při řezání dochází k ovlivnění kvality spáry a velikosti reliéfu – stopy po paprsku viz obr. 9.

Tuto stopu lze rozdělit na tři základní oblasti:

- hladká zóna – oblast kvalitního povrchu,
- přechodová zóna,
- rýhovaná zóna – oblast se stopami vodního paprsku.



Obrázek 9: Ukázka základních zón povrchu po řezání technologií AWJ

Hydraulický faktor – díky zvyšujícímu tlaku vody se zrychluje proudění, a tím i celková energie. To má za následek zlepšující se kvalitu řezné spáry a také možnost řezat tlustší materiály.

Abrazivní faktor – na proces řezání má především vliv druhu použitého abraziva, jeho tvar, zrnitost a tvrdost. Se vzrůstajícím hmotnostním tokem abraziva se do určité míry zvyšuje i řezaná hloubka. Hmotnostní tok abraziva je ovlivněn tvarem a rozměry směšovací komory (S. Hloch, J. Valíček, 2008)

Technologické faktory – se zvyšující se hodnotou posuvové rychlosti se zhoršuje kvalita řezu. Ta je hodnocena na základě metodiky spočívající v rozdělení kvality do pěti kvalitativních stupňů Q1,.....,Q5, viz obr. 10 (Q1 – dělicí řez a Q5 nejlepší řez). Tento způsob hodnocení je běžně využíván i v praxi, avšak jednotlivé stupně hodnocení kvality nemají jednoznačně určené požadavky. Při hodnocení kvality řezu se lze tedy řídit dle vlastních kvalitativních normativů a hodnocení Q1 až Q5 použít pro předběžné stanovení procesních parametrů řezání. Tabulka 1 udává pouze přibližné hodnoty jednotlivých stupňů přesnosti. Skutečné hodnoty se mohou lišit dle řezaného typu materiálu. (SN 214001, 2010, P. Hlaváček, 2012)



Obrázek 10: Ukázka kvalitativních stupňů při řezání vodním paprskem
Zdroj: ELNASERVIS.CZ, 2020

Tabulka 1: Hodnocení kvality dle výrobců a dodavatelů technologie vodního paprsku

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristiky	Drsnost Ra (μm) horní kontura	Drsnost Ra (μm) spodní kontura	Tvarová přesnost (mm) horní kontura	Tvarová přesnost (mm) spodní kontura	Úkos
Q5	nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	do 12,5	$\pm 0,15$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q2	hrubý řez	cca 4,0	do 25	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q1	dělicí řez	4,0-6,3	do 40	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	výrazný úkos do +
poznámka: hodnoty se mohou lišit dle typu řezaného materiálu						

Zdroj: REZANI-CNC.CZ, 2020

Přesné obrábění technologií vodního paprsku má při zpracování materiálů jako jsou např. speciální slitiny nebo jiné specifické materiály řadu výhod. Oproti klasickým metodám třískového obrábění s využitím moderních CNC obráběcích strojů je zde

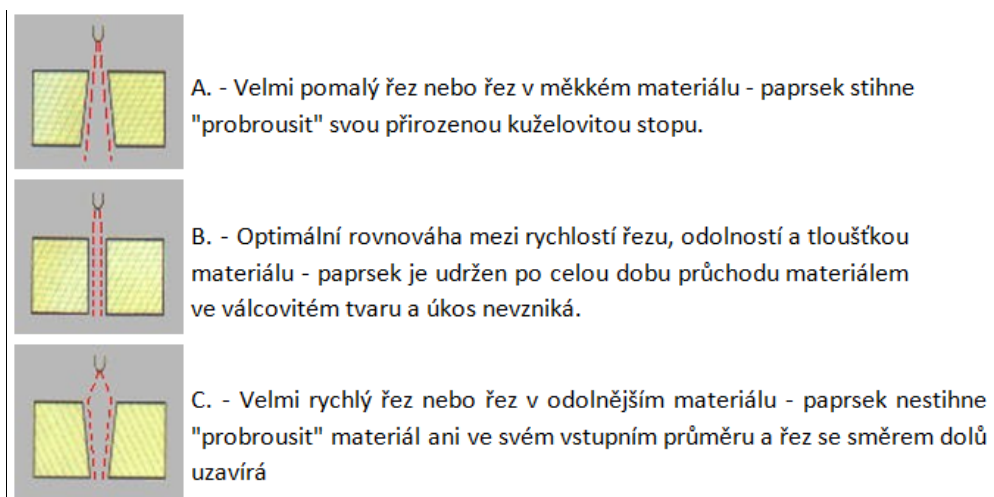
možné realizovat opracování velmi tenkých, pružných nebo deformačně citlivých materiálů, jako jsou plasty, pryže, kompozitní materiály, lidské tkáně aj.

S ohledem na dosaženou kvalitu řezu je při řezání technologií AWJ nutné vzít v potaz více vlivů najednou. Nejdůležitější je však vědět, jaké jsou požadavky na kvalitu řezu. Podle těchto požadavků se upravují jednotlivé technologické veličiny a vstupní parametry řezání. Vhodným nastavením parametrů řezání a jejich vlivem na dosaženou kvalitu řezu se již zabývala řada odborníků v literatuře. (S. Hloch, J. Valíček, 2008)

Hydraulické parametry, technické parametry proudu vody, tvar a zrnitost abraziva, materiálové parametry jako pevnost v tlaku, tahu, modul pružnosti aj. tak tvoří základní vstupy pro řezání technologií AWJ.

2.4 Vady při dělení vodním paprskem

Ve většině případů při řezání vodním či hydroabrazivním paprskem vzniká určitý úkos 1° až $1,5^\circ$. Při řezání velmi tvrdého, silného materiálu a při vysoké rychlosti řezu paprsek "probrousí" v řezu přirozenou jemnou kuželovitou, téměř kolmou stopu. Avšak s rostoucí posuvovou rychlostí řezu dochází často k zakřivení paprsku a vzniku rýh po celé hloubce řezu tzv. striaci. Tyto rýhy vznikají z důvodu ztráty kinetické energie paprsku a jeho vychýlením. Tvar a velikosti striace je závislá na řezaném materiálu, jeho tloušťce a zmiňované posuvové rychlosti. Při tvorbě striace dochází ke zvlnění stěn řezu a změně drsnosti povrchu. Pokud je však nastavena rovnováha mezi rychlostí řezu, typem materiálu a jeho tloušťkou nedochází k výraznému zakřivení paprsku ani vzniku úkosu viz obr. 11. Dosažená kvalita řezu lze definovat pomocí parametru drsnosti Ra , zpožděné řezné stopy Y_{ret} a deviačního úhlu D . (J. Dvořáková, J. Dvořák, 2008)



Obrázek 11: Vliv parametrů řezání technologií AWJ na kvalitu řezu
Zdroj: ZADANI-SEMINARKY.CZ, 2020

Při řezání vodním paprskem se běžně vyskytují vady jako rozšířená řezná mezera, odchylka kolmosti, odklon proudu, zpoždování paprsku, již zmíněná striace (rýhování povrchu), nepravidelná hloubka řezu, neúplný konec řezu, povrchové vady a kazy např. koroze. Podrobněji budou tyto vady a jejich výskyt popsány společně s vadami po laserovém řezání v praktické části práce. (J. Dvořáková, J. Dvořák, 2008)

2.5 Použití technologie vodního paprsku

Technologie vodního paprsku (s abrazivem nebo bez) je v mnoha ohledech unikátní a ekologicky přijatelná. Při porovnání technologie vodního paprsku s ostatními technologiemi dělení (laser, plasma apod.) je zřejmé, že při řezání vodním paprskem nedochází k produkci žádného nebezpečného odpadu. I toto je jedna z příčin, které vedou k rozšíření technologie vodního paprsku do téměř všech odvětví:

- **Strojírenství** – řezání, výroba závitů, vrtání, soustružení, frézování, čištění, tryskání a leštění.
- **Stavební průmysl** – řezání hornin, keramiky, betonu aj.
- **Potravinářský průmysl** – pro řezání a dělení potravin např. oplatků, zmražených potravin, masa apod.
- **Chemický průmysl** – k řezání trhavin a výbušných látek jako dynamitu.

- **Textilní průmysl** – dělení látek a kůže.
- **Elektrotechnický a jaderný průmysl** – dělení permanentních magnetů, odstraňování železobetonových konstrukcí aj.
- **Medicína** – dělení lidských tkání jako svalů, kostí apod.

Ve všech těchto odvětvích přináší vodní paprsek řadu výhod, ale i komplikací:

- vysoká energetická účinnost až 80 % (ve srovnání s laserovou technologií) při relativně nízké energetické náročnosti,
- nedochází k přímému kontaktu s obrobkem, malá citlivost na vzdálenost trysky od materiálu,
- nevzniká tepelně ovlivněná oblast povrchu ani nedochází ke změně struktury materiálu, teplota řezu do 50 °C.
- dochází pouze k minimálnímu silovému zatížení, nevznikají deformace ani zbytková napětí v materiálu,
- univerzálnost, možnost řezat široké spektrum materiálů, včetně vrstvených (vícesložkových kompozitních materiálů),
- tvarová různorodost a vysoká přesnost řezu (až 0,1 mm) bez nutnosti dalšího opracování,
- vysoká ekologičnost, možnost práce pod vodou, ve výbušném prostředí,
- vysoká spolehlivost, jednoduchost a cenová dostupnost aj.

(L. Bodnárová, 2001)

Mezi nejčastější nevýhody technologie vodního paprsku patří:

- kontakt s vodou a abrazivním materiálem,
- delaminace některých lepených materiálů,
- možnost výskytu povrchové koroze a vad na řezných plochách,
- delší vysoušení u savých materiálů, možná změna barvy v okolí řezu,
- nadměrná hlučnost při řezání až 100 dB,
- poměrně vysoká cena abraziva.

3 Laserová technologie

Trendem současné doby je rychlost, která se projevuje hlavně ve výrobě komponent a různých strojních součástí. S tímto trendem souvisí i rostoucí požadavky na kvalitu a spolehlivost výroby. V návaznosti na tyto požadavky se zvyšují také nároky na výrobní technologie. Schopnost efektivně a rychle reagovat na stávající potřeby trhu a koncových zákazníků je příčinou širšího uplatnění laserů ve výrobě. Bez ohledu na použití představuje laser velmi jednoduchý, ale precizní nástroj bez nutnosti mechanického kontaktu s obráběným materiálem. Laserová technologie patří mezi nejprogresivnější způsoby působení člověka na materiál. Vyznačuje se efektivním opracováním materiálů bez ohledu na jejich mechanické a fyzikální vlastnosti, opracováním s vysokým stupněm tvarové a rozměrové přesnosti a vysokou produktivitou práce. Laserová technologie tak převyšuje ostatní nekonvenční technologie opracování materiálu ve všech důležitých aspektech výroby, jako je výkonnost, přesnost, flexibilita apod.

Díky svým vlastnostem se stal laser standardním nástrojem pro dělení materiálů hlavně ve strojírenství. Avšak bez ohledu na jeho použití se lze s laserem díky jeho všestrannému využití setkat téměř ve všech oblastech lidských činností například v informatice, telekomunikacích, kosmickém průmyslu, medicíně, chemickém a biologickém průmyslu a dalších. (J. Šmíd, 2010, J. Řasa, R. Jindrová 2006)

3.1 Laser a jeho princip

Použití laseru představuje především obrábění a opracování materiálů, založené na využití schopnosti výkonných laserů koncentrovat energii optického záření v prostoru, čase i spektrálním intervalu a na interakci záření s látkou. Laser je tak schopen měnit prakticky jakýkoli druh energie na energii koherentního elektromagnetického záření. Lasery tak mohou dodávat velký výkon záření v kontinuálním režimu (desítky kilowat) i vysoký střední výkon v pulsním režimu, kdy mohou být generovány impulsy s přesně určenou délkou a velikostí energie. Laserový

paprsek je tedy elektromagnetické záření, které se od jiných druhů světelných záření liší pouze svoji vlnovou délkou. Ostatní světelná záření se v prostoru šíří všemi směry. (MM Průmyslové spektrum, 1997)

Lasery generované záření je oproti jiným světelným zařízením monochromatické a koherentní. Lze ho tedy pomocí jednoduché čočky nebo soustavy zrcadel fokusovat do velmi malé plochy o velikosti několika desítek mikrometrů. Takto fokusovaný paprsek dosahuje ohromné množství energie a vysoké teploty. Při procesu dělení materiálu tak dochází nejdříve k jeho ohřevu, tavení a následně se obráběný materiál odpaří. Tento proces je natolik rychlý, že dochází pouze k minimálnímu přestupu tepla a vzniku malé tepelně ovlivněné oblasti bez výrazné změny materiálové struktury. (Lascam.cz, 2015)

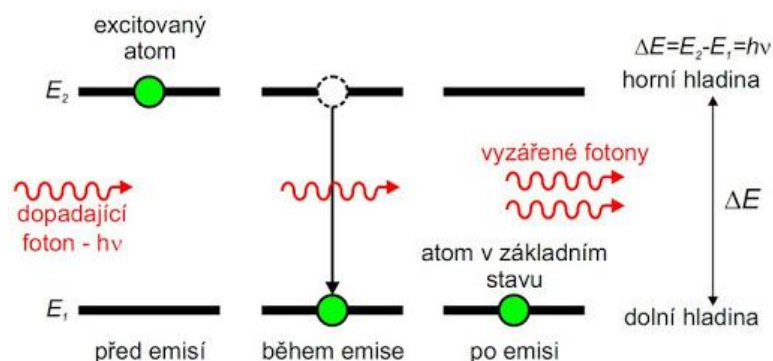


*Obrázek 12: Technologie laserového řezání
Zdroj: LASCAM.cz, 2015*

3.2 Historie laserového záření

Laser – Light Amplicification by Stimulated Emission of Radiation v překladu zesílení světla pomocí vynucené emise záření. Základy o vynucené emisi podal již v roce 1917 fyzik Albert Einstein. Upozornil na to, že kromě spontánní emise (samovolné emise) existuje i vynucená emise (stimulovaná emise) viz obr. 13. Tzn., že atomy mohou vyzařovat světlo nejen spontánně ale i vynuceným způsobem. V podstatě se jednalo o to, že foton dopadá na atom ve vyšším energetickém stavu

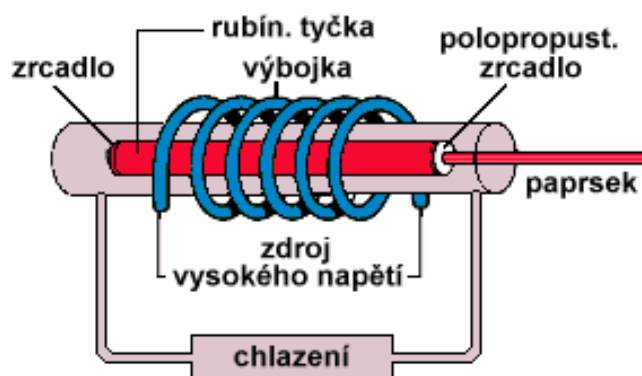
a přiměje ho k přechodu na nižší energetický stav za vyzáření dalšího fotonu. Tyto dva fotony se nepohltí a pokračují dále ve stejném směru. (P. Kořán, 2013)



Obrázek 13: Princip stimulované emise záření
Zdroj: LAO.CZ, 2011

Důležitý krok vedoucí k vynálezu laseru udělal ruský fyzik V. A. Fabrikant, který v roce 1939 upozornil na zesílení elektromagnetického záření pomocí vynucené (stimulované) emise. Následně byl v roce 1951 ruským fyzikům V. A. Fabrikantovi, M. M. Vudynskému a F. A. Butajevové udělen patent týkající se elektromagnetického záření a jeho zesilování. Na základě tohoto patentu se podařilo sestavit první zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření – kvantový generátor, které se stalo předchůdcem dnešního laseru a bylo označováno symbolem Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tento objev zesilující mikrovlny pomocí vynucené emise sestavili v roce 1953 Charles Townes, J. P. Gordon a H. J. Zeiger. (B. Benko, 2000)

První funkční laser byl sestaven až v roce 1960 a postaral se o to americký vynálezce T. H. Maiman. Zařízení však mohlo pracovat pouze v pulzním režimu. Vyřešit problém s nepřetržitým výstupem záření se podařilo až ruským fyzikům Nikolaji Basovi a Alexandru Prochorovi. V roce 1964 vědec Nikolaj Basov s kolegy C. H. Townsem a A. Prochodivem dostali Nobelovu cenu za zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky vedoucí ke konstrukci zesilovačů a oscilátorů pracujících na principu maseru a laseru. (laserart.wbs.cz, 2020)

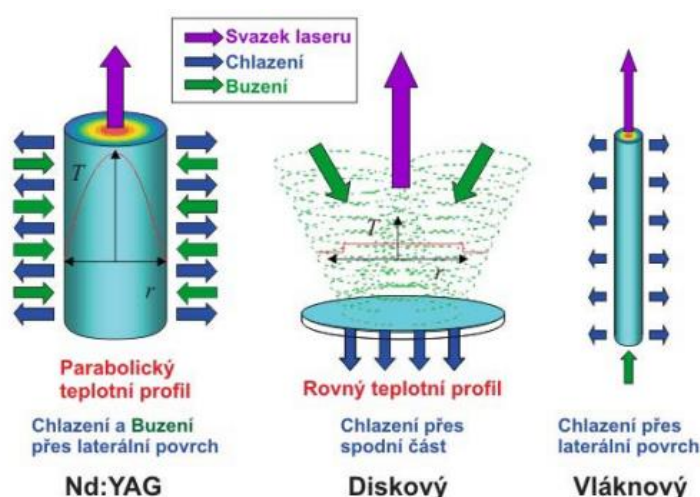


Obrázek 14: Princip prvního laserového zařízení
Zdroj:CEZ.CZ, 2020

Od sestrojení prvního laseru už uběhlo několik desítek let. V současné době existuje nepřeberné množství laserových strojů a zařízení odlišujících se konstrukcí, vlastnostmi, parametry, způsobem buzení, druhem aktivního média apod. Ale i dnešní nejmodernější a nejvýkonnější lasery vycházejí z primitivního konceptu, viz obr. 14. Na základě použité aktivní látky (pevná, plynná, kapalná) může laser vypadat jako elektronická miniaturní součástka, jako skleněné vlákno nebo jako chemická aparatura a přitom čerpat svou energii z elektrické baterie, ze slunečního záření nebo například z jaderného výbuchu.

3.3 Konstrukce laserového zařízení a jejich rozdělení

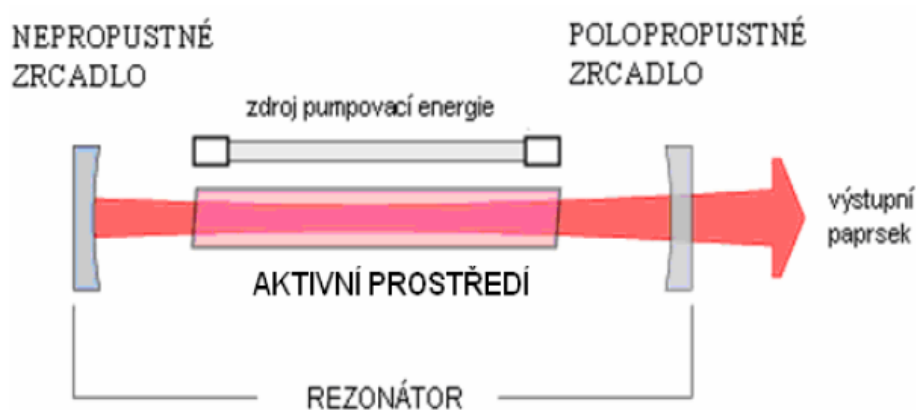
V současnosti na trhu existuje nepřeberné množství různých typů laserových zařízení určených pro různé oblasti použití. Každé toto zařízení obsahuje tři základní části, které jsou společné pro všechny lasery. Je to aktivní prostředí, kde dochází k zesilování záření. Aktivní prostředí je látka, která obsahuje oddělené energetické hladiny elektronů, je nasycena atomy, ionty a molekulami s vyšší energetickou hladinou. Toto aktivní prostředí může být plynné, obsahuje jeden nebo více plynů, pevnolátkové, kde prostředí tvoří krystal nebo kapalinové prostředí tvořené roztoky organických barviv. (B. Benko, 2000) Jednotlivé zdroje laserového záření lze vidět na obrázku 15.



Obrázek 15: Rozdíly aktivního prostředí

Zdroj: LASCAM.cz, 2015

Dále je součástí laseru budící zdroj určený pro excitaci aktivního prostředí a zajištění energie pro dostatek kvantových soustav. Způsob buzení závisí na druhu použitého aktivního prostředí. Například plynné prostředí je buzeno nejčastěji pomocí elektrického výboje, nebo pevné prostředí, které je buzeno výbojkami (lampami). Pro buzení lze využít také chemickou reakci, rychlou expanzi plynu, nebo jiného optického záření. Další částí, která tvoří tělo laseru je rezonanční systém (rezonátor), který vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím. Jedná se o optický systém, který umožňuje zformovat a zesílit záření. Samotná konstrukce rezonátoru určuje intenzitu záření, koherenci, spektrální a prostorové charakteristiky. Rezonátor je tvořený jedním nepropustným a druhým polopropustným zrcadlem, které při větší intenzitě propouští fotony z aktivního prostředí, jinak je dále udržuje v aktivním prostředí. Existují však lasery (super radiační), které rezonátory nepotřebují. Tyto lasery dokážou vyvinout velkou energii při jednom průchodu aktivním prostředím. Neodmyslitelnou součástí konstrukce laserového zařízení je také chladicí systém. Ten má zpravidla za úkol odvést nevyužitou energii, která se mění v tepelnou tak, aby nedošlo k přerušování generování záření. Nejčastěji se pro chlazení používá voda, která protéká celou dutinou budícího zařízení nebo protéká trubicemi kolem laserového krystalu a výbojek. (B. Benko, 2000)



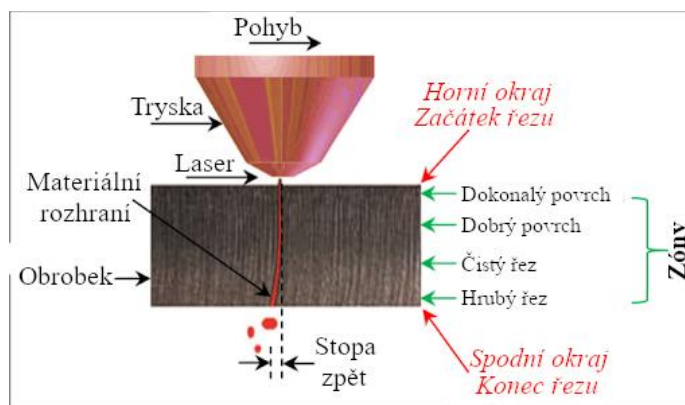
Obrázek 16: Konstrukce laseru a jeho základní části
Zdroj: OPTICLABS.CS, 2020

I přesto, že lasery fungují na podobném principu, liší se hlavně díky svojí konstrukci a vlastnostem. Vzhledem k vlastnostem a výhodám, které sebou laserová technologie přináší, si laser našel široké uplatnění téměř ve všech oborech lidských činností. Lasery lze dle různých hledisek a kritérií rozdělit:

- aktivní prostředí (pevnolátkové, polovodičové, plynné, kapalinové, plazmatické),
- podle vlnové délky záření (infračervené, viditelného pásma, ultrafialové, rentgenové),
- kvantového přechodu (molekulární, elektronové, jaderné),
- typu buzení (optické, buzené elektrickým výbojem, buzené elektronovým svazkem, tepelnými změnami, chemicky aj.),
- časového režimu (kontinuální a pulsní),
- konstrukce (pohyblivý obrobek a pevný laser, pevný obrobek a pohyblivý laser);
- výkonu (nízkovýkonové, vysokovýkonové),
- druhu použití (kdy se ve strojírenství uplatňuje dělení do šesti kategorií podle DIN 8580, nebo do čtyř podle Taniguchiho). (Lascam.cz, 2015)

3.4 Proces řezání pomocí laserové technologie

Technologie laserového řezání je v současné době nejrozšířenějším použitím laseru v průmyslové výrobě. V podstatě se jedná o přeměnu světelné energie na tepelnou. Paprsek je pomocí čočky fokusován na povrchu materiálu a při dotyku paprsku s povrchem kovového materiálu dochází k velmi intenzivnímu ohřátí malého objemu materiálu až na teplotu tavení. Natavená oblast materiálu se rychle rozšiřuje a materiál se dalším intenzivním působením laserového svazku začíná odpařovat (pevná látka se vlivem sublimační teploty mění na plyn). V zóně, kde dochází k natavení materiálu, vznikají poměrně vysoké tlaky, kterými je tavenina přemísťovaná z místa řezu. V důsledku toho se v místě dotyku vytváří malý otvor a laserový paprsek tak může pronikat hlouběji do otvoru. K tomuto zpravidla dochází při interakci laserového záření a obráběného materiálu v ochranné atmosféře inertního plynu. Laser tak díky tomu dokáže velmi vysokou rychlostí dělit téměř všechny materiály bez ohledu na jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. I tak se proces řezání aplikuje především na materiály s nižší tepelnou vodivostí, a to i z důvodu malého tepelného ovlivnění a vzniku co nejmenší tepelně ovlivněné oblasti. (Lascam.cz,2015)



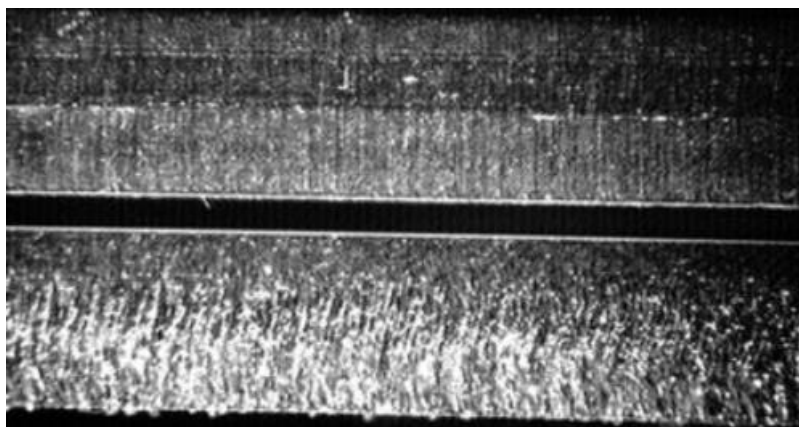
Obrázek 17: Schéma řezání svazkem laseru

Zdroj: ALSOUFI M. S., SUKER D. K., ALSABBAN A S. AZAM S, 2016

Se vznikem tepelně ovlivněné oblasti v průběhu řezání materiálu úzce souvisí i dosažená kvalita povrchu řezu. Ta je jednou z velkých výhod použití laseru při dělení materiálu v průmyslu. Výrobky řezané pomocí technologie laseru zpravidla nevyžadují již žádné dodatečné opracování. Navíc při správně zvolených parametrech lze

s ohledem na řezanou tloušťku a druh materiálu minimalizovat vliv negativních jevů procesu řezání a výskyt defektů na povrchu. Při laserovém obrábění je však nutné vždy volit tyto parametry s ohledem na obráběný materiál. U technologie laserového řezání se jedná nejčastěji o vliv velikosti nastaveného výkonu laserového svazku, řezné (posuvové) rychlosti, nastavení ohniskové vzdálenosti a polohy ohniska od povrchu obrobku, druhu asistenčního plynu, jeho pracovního tlaku aj. (P. Kořán, 2013)

Oproti vodnímu paprsku nelze u technologie laserového řezání měnit kvalitu řezu v různých stupních v závislosti na nastavení řezacích parametrů. Proto je obvykle nutné najít vhodnou kombinaci parametrů, a tím dosáhnout předepsané kvality řezu. Bližší popis klasifikace a hodnocení kvality řezu po tepelném dělení je uveden v normě ČSN EN ISO 9013, která je českou verzí evropské normy EN ISO 9013:2002. Z této normy se bude také vycházet při hodnocení kvality povrchu u vyřezaných zkušebních vzorků v praktické části práce. V této části práce budou také podrobněji popsány jednotlivé typy vad vyskytující se na povrchu řezné hrany.



*Obrázek 18: Struktura povrchu po laserovém řezání
Zdroj: MMSPEKTRUM, 2011*

3.5 Využití laseru v praxi, jeho výhody a nevýhody

Díky unikátním vlastnostem a rychlému vývoji představuje laser v současné době univerzální nástroj, který je nedílnou součástí našich životů a je používán napříč všemi lidskými obory. Ihned po sestrojení prvního laseru se toto zařízení začalo používat ve strojírenství. Zde se prosadily lasery především na principu pevnolátkových a plynových laserů. Tyto lasery našly ve strojírenství uplatnění hned pro několik operací, jako je řezání, svařování a pájení, značení a gravírování, mikroobrábění, kalení apod. V obrábění lze laser využít také jako efektivní nástroj pro předehřev těžkoobrobitelných materiálů. V medicíně se lze s laserovou technologií setkat například při operaci očí, v dermatologii, chirurgii nebo v onkologii při léčbě rakoviny a rakovinotvorných buněk. Mezi další oblasti použití laseru patří obory jako astronomie, geodézie a geofyzika, ekologie, metrologie (přesné měřicí systémy aj.), při kopírování a tisknutí (např. 3D tisk práškových kovů).

Od 80. let minulého století se technologie laseru neustále rozvíjí a její výrobou se zabývá stále více společností. I z tohoto důvodu pořizovací cena strojů stále klesá a technologie laseru se tak stává dostupnější. Proto i dnes laser tvoří neodmyslitelnou část strojírenské výroby a jeho použití sebou přináší i řadu výhod.

Mezi výhody použití laseru patří:

- možnost opracování bez kontaktu s výrobkem,
- obrábění bez silového zatížení obrobku,
- malá tepelně ovlivněná oblast,
- obrábění i velmi těžkoobrobitelných materiálů při vysoké rychlosti obrábění
- velmi malá řezná spára, lze dodržet tolerance 0,05 mm,
- vysoce precizní a rychlý proces,
- laserem lze vytvářet jakýkoliv tvar bez nutnosti výměny nástroje,
- relativně tichá a čistá technologie umožňující řezání všemi směry,
- laser lze pomocí optické soustavy zavést z jednoho zdroje na několik pracovišť,

- extrémní koncentrace a hustota energie, jednoduchá regulace výkonu a snadné ovládání,
- umožňuje svařování i těžko dostupných míst, přičemž způsobuje malá tepelná pnutí a deformace uvnitř materiálu,
- vyžaduje minimální dokončovací operace.

Mezi časté nevýhody laseru patří:

- vyšší pořizovací cena ve srovnání s vodním paprskem,
- přísná bezpečnostní opatření,
- vznik TOO a vad typických pro tepelné dělení,
- nižší účinnost vůči příkonu zařízení. (lascam.cz, 2015)

4 Praktická část práce

Zadání této bakalářské práce vzniklo z požadavků společnosti AŽD Praha s.r.o. po inovaci stávajícího procesu výroby komponent, které jsou součástí výměnového zámku. Tato společnost se zabývá strojírenskou výrobou součástí pro zabezpečovací techniku v silniční i kolejové dopravě. V současnosti společnost poskytuje řešení pro projektování staveb, strojírenskou výrobu, kompletní dodání zabezpečovací techniky, její instalaci a uvedení do provozu. Jedná se například o venkovní zabezpečovací zařízení pro kolejovou dopravu, jehož součástí jsou i výměnové kontrolní a jednoduché zámky.

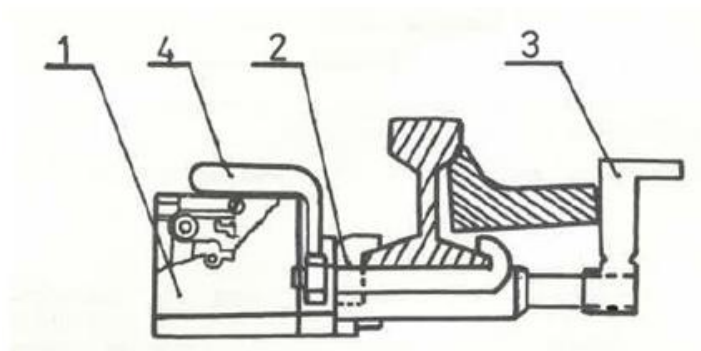
Návrh nové technologie výroby součástí je v souladu s dlouhodobou strategií společnosti optimalizovat své stávající výrobní procesy. Společnost si od zavedení strategie slibuje zejména zvýšení výrobního výkonu, efektivity práce a dlouhodobé snižování výrobních nákladů. I s ohledem na tuto strategii, finanční a časovou náročnost výroby byla pro tuto bakalářskou práci vybrána typová součást.

Jednotlivé operace obrábění vybrané součásti budou v rámci zpracování bakalářské práce realizovány ve výrobních podmínkách společnosti AŽD Praha s.r.o. Zde také bude u vyrobených vzorků změřena tvarová a rozměrová přesnost. Hodnocení kvality povrchu vyřezaných vzorků bude realizováno v laboratorních podmínkách a na zařízení Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie Fakulty strojní Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

4.1 Představení typové součástky výroby

Výměnový zámek je zařízení, které slouží v kolejišti jako kontrola jazyků místně stavěných výměn a hrotů přestavitelných srdcovek ve správné poloze. Výměnové zámky svým použitím zabraňují neoprávněnému přestavění výměn na návěstidlech. Dle použití zámků je lze rozdělit na jednoduché, kontrolní, odtlačné, stojanové a přenosné. Kontrolní výměnový zámek se používá k vytvoření závislosti mezi dvěma výhybkami, výhybkou a výkolejkou, výhybkou a vlastní přestavitelnou srdcovkou.

V kolejišti jsou na sebe namontovány vždy dva na sebe závislé výměnové zámky se společným krytem, upevňovací soupravou a výhybkou s rukojetí. Kontrolní výměnový zámek je namontován na druhou výhybku (výkolejku) a jednoduchý výměnový zámek je namontován na závislou výhybku viz obr. 19.



Obrázek 19: Jednoduchý výměnový zámek
Zdroj: Zabezpečovací technika v kolejové dopravě, Nadas, 1972

1 – výměnový zámek s krytem, 2 – pevná připevňovací souprava, 3 – závěrný hák, 4 – rukojeť závěrného háku

4.2 Stávající proces výroby

Pro stávající proces výroby zámku se používá jako polotovary tabule plechu tloušťky 3 mm. Ten se pomocí strojních nůžek nadělí na pásy šířky 77 mm o délce 1000 mm v toleranci (+0,5/-0,0). Takto uštěpený pás plechu je použit pro výrobu 10 kusů zásuvky, viz číslo výkresu 04006D10, D11, D12, D20. Následně se tyto kusy musí zbavit otřepů, které vznikají po stříhání, aby se zachovala přesnost při lisování a nedošlo k poškození součásti, nebo úrazu operátora. Opracované plechy jsou dále lisovány, čímž je dosažen základní tvar součásti a taktéž požadovaná rovinnost. Vyrovnané plechy jsou připraveny pro zámečnickou operaci, během níž se zahlubí otvory pro 5 ks nýtů, plech se zbaví otřepů po zahloubení a připraví se pro další operaci. Zásuvka se skládá celkem ze čtyř takto vylisovaných plechů, které jsou určeny pro další zpracování. Postupy výroby těchto dílců jsou součástí přílohy.

Dalším krokem výroby jsou zámečnické práce, během nichž se snýtují plechy pomocí lisu a 5ks nýtů. Následuje operace svařování a zabroušení svarů do roviny včetně hlav nýtů viz obr. 20. Finální opracování dílu je realizováno pomocí operace frézování, kdy je součást upnuta na magnetickou desku a postupně se frézují čelní i obvodové plochy na požadovaný rozměr, viz výrobní postup součásti. Nakonec se součást zbaví otřepů vzniklých při frézování v zámečnické dílně.



Obrázek 20: Ukázka jednotlivých operací výroby u zásuvky 04006-0-008

5.2.1. Materiál plechu – S235JRC

Jedná se o běžnou nelegovanou uhlíkovou ocel, která může být použita ve velmi širokém rozsahu výrobních procesů. Tuto ocel lze vyhledat také pod označením 1.0120 nebo dle ČSN 11 375. Ocel S235 je vhodná ke svařování, a to téměř všemi dostupnými metodami. Běžně se tato ocel používá pro tenkostěnné konstrukce strojů a výrobu méně namáhaných součástí. Určitou modifikací oceli (značka oceli obsahuje písmeno C) lze zajistit vhodnost pro tváření, a to jak za tepla i za studena (výroba válcovaných plechů) nebo vhodnost pro svařované konstrukce se statickým i dynamickým namáháním (výroba energetických zařízení, tlakových nádob, profilů a trubek).

Tabulka 2: Bližší informace o materiálu uvedené v materiálovém listu

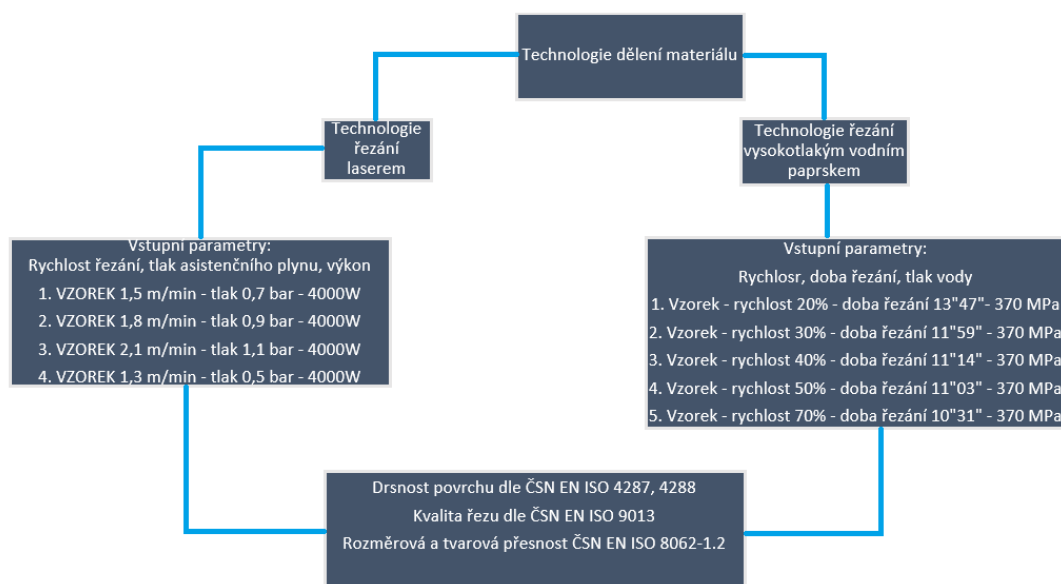
Chemické složení	C	Mn	P	S	N	Cu
Hm. %	0,17	1,40	0,03	0,03	0,01	0,55
Mechanické vlastnosti	Mez kluzu Re	Mez pevnosti Rm	Tažnost A ₅	Nárazová práce KV ⁻²⁰		
Hodnoty	235 MPa	410 MPa	20 %	27 J		

4.3 Návrh nové technologie výroby

Stále rostoucí požadavky na kvalitu, produktivitu výroby, přesnost vyráběných součástí a tvarovou složitost z hlediska jejich použití vyžaduje používání nových progresivních technologií. Mezi tyto progresivní technologie patří již zmiňované nekonvenční technologie, a to technologie vysokotlakého abrazivního vodního paprsku a technologie vysoce výkonových laserových systémů. U těchto technologií dochází k úběru materiálu v důsledku fyzikálních principů, a to nejčastěji tepelných, chemických, elektrochemických, mechanických nebo jejich kombinací. Nově navržené technologie pro výrobu součástí umožňují efektivně obrábět různé druhy materiálů bez ohledu na jejich vlastnosti a obrobiteľnost, jejich použitím se dosahuje velmi přesného opracování a při zavedení plné automatizace lze získat i velkých časových úspor. Tyto

technologie umožňují výrobním společnostem inovovat svoje stávající výrobní procesy a posílit tak konkurenceschopnost a svoje postavení na trhu.

Při návrhu nové technologie výroby výměnového zámku byly pro výrobu zkušebních vzorků s ohledem na produktivitu práce a dosaženou kvalitu řezu navrženy parametry řezání viz, obr. 21 schéma navržené experimentální činnosti. Tyto parametry byly konzultovány s technickými zástupci obou společnostmi, které dodávají zvolené technologie dělení materiálu na trh.



Obrázek 21: Schéma navržené experimentální činnosti

5.3.1. Návrh nové technologie výroby pomocí technologie vodního paprsku

Při návrhu nové technologie výroby zásuvky výměnového zámku ve společnosti AŽD Praha s.r.o. byla na základě technické rozvahy zahrnující posouzení tvaru a rozměrů součástí, druhu obráběného materiálu, požadované produktivity práce a kvality opracování navržena nekonvenční technologie vysokotlakého abrazivního vodního paprsku. Tato technologie nabízí oproti ostatním nekonvenčním technologiím dělení materiálu řadu výhod. Při obrábění zkušebních vzorků docházelo k odstraňování materiálu a vzniku řezné spáry vlivem abrazivních zrn unášených proudem vody. V důsledku tzv. studeného řezu nevznikala tepelně ovlivněná oblast, která by mohla být místem vzniku trhlin do materiálu. Kvalita povrchu řezné spáry je dána nastavením

jednotlivých kvalitativních stupňů přesnosti, pro které je od výrobce stroje předem nadefinovaná rychlost řezání (posuvu) vyjádřená procenty. S rostoucí hodnotou řeznou (posuvovou) rychlostí se úměrně zkracovala doba potřebná na vyřezání jednoho kusu součásti, což se odráželo hlavně na produktivitě práce, ale také na kvalitě povrchu řezu a vzniku reliéfu. Mimo rostoucí řezné rychlosti měly na kvalitu povrchu vliv s ohledem na tloušťku a druh materiálu také hodnota tlaku vody, viz, obr. 21 schéma navržené experimentální činnosti, velikost a druh použitého abrazivního média, velikost trysky aj.

- **Použitý stroj pro řezání vysokotlakým abrazivním vodním paprskem a jeho technické parametry**

Stroj pro řezání vodním paprskem byl pořízen od společnosti Flow s.r.o. s označením Mach 3b-4020b, Edition 35, viz obr. 22. V tomto případě se jedná o volně stojící portálový vyřezávací systém, který je poháněn pomocí servomotoru. Tento typ stroje je řízený pomocí počítačové jednotky FlowMaster, která zahrnuje systém CAD, systém definování dráhy, ovládací prvky a diagnostiku. Pohyb v osách X a Y je realizován pomocí digitálního servopohonu a vysoce přesnému vedení kuličkových šroubů. Tím je zajištěna požadovaná vysoká přesnost řezání. Součástí stroje je také čerpadlo s intenzifikátorem 4150 bar, tuhá ocelová konstrukce, kalibrovaný měřicí systém, systém „Passer cutting“ – řezací hlava, jednotka pro optimální dávkování abraziva aj. Stroj disponuje i kompenzací zpoždění a úkosu paprsku, také se automaticky naklápí a sleduje rychlost řezací hlavy, čímž je dosažena ještě vyšší přesnost řezání. Tento koncept stroje umožňuje řezat plechy o velikosti 4000 x 2000 mm o tloušťce až 170 mm.



Obrázek 22: Stroj pro řezání vodním paprskem Mach 3b-4020b, Edition 35 od společnosti Flow s.r.o.

Tabulka 3: Technické parametry stroje a použitého abrazivního média:

Model	Max. délka [mm]	Max. šířka [mm]	Max. tl. řezaného materiálu [mm]	Max. rychlost [m/min]
Mach 3B-4020b	4000	2000	170	7,6
Abrazivní médium	Typ	Zrnitost	Tvar zrna	Tvrdost
Garnet MESH #80	Australský granát	Mesh 80	Kubický	7-7,5 Mohs

5.3.2. Návrh nové technologie výroby pomocí laserové technologie

V průběhu řezání zkušebních vzorků pomocí laserové technologie docházelo vlivem účinků velmi silného monochromatického světla k natavení obráběného materiálu. Ohřátím materiálu na vysokou teplotu vznikala v místě řezu tavenina, která se odpařovala nebo byla vyfukována z místa řezu pomocí tlaku asistenčního plynu. Proces řezání zkušebních vzorků byl ovlivněn nastavením některých výkonových a procesních parametrů. V mém případě se jednalo o parametry, které jsou uvedeny, viz obr. 21 schéma navržené experimentální činnosti, a to konstantní výkon 4000 W, proměnlivá řezná (posuvová) rychlost řezání a tlak asistenčního plynu. Společně s těmito parametry se na dosažené kvalitě řezu podílela také poloha ohniska a nastavení ohniskové vzdálenosti, odstup trysky od povrchu řezaného vzorku, průměr a geometrie trysky, druh a čistota asistenčního plynu.

Hodnoty řezné (posuvové) rychlosti řezání v experimentu byly zvoleny s ohledem na tloušťku a druh řezaného materiálu. Nastavená hodnota rychlosti má v průběhu řezání vliv na dosažnou drsnost povrchu, vznik otřepů a sníženou kvalitu řezu. S její rostoucí hodnotou se bude úměrně zvyšovat také tlak asistenčního plynu. Pro řezání zkušebních vzorků byl jako asistenční plyn navržen dusík o vysoké čistotě. Vzdálenost trysky od povrchu obrobku bude 0,9 mm a relativní poloha ohniska 1 mm pod jeho povrchem. Jedná se tedy o tavný způsob řezání laserem.

- **Použitý laserový systém a jeho technické parametry**

Pro řezání zkušebních vzorků byl použit laserový systém od společnosti TRUMPF s.r.o. Přesněji byl použit 2D laserový řezací stroj s označením TruLaser 3030 s laserem

Truflow 4000. Jedná se o plynový CO₂ laser určený pro řezání a označování 2D tvarů do plechů z konstrukčních a korozivzdorných ocelí, slitin hliníku, mědi a dalších neželezných materiálů. Tento laserový stroj spojuje vysoký výkon s vynikající kvalitou řezu, vytváří zrcadlově hladké řezné hrany, které už není potřeba dokončovat. Konstrukce stroje je kompaktní a díky rozměrům umožňuje zpracovat plechy formátu 1500 x 3000 mm o maximální tloušťce 20 mm. U tohoto stroje je možné využít off-line programování pomocí softwaru JET/CAM, který zaručuje vysokou přesnost výroby a maximální využití plochy plechu. Přesnost řezání je v souladu s normou ČSN EN ISO 9013.(trumpf.com, 2020)



Obrázek 23: Laserový řezací systém TruLaser 3030 od společnosti Trumpf
















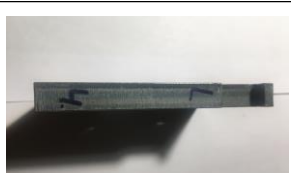


Model	Max. délka [mm]	Max. šířka [mm]	Max. tl. řezaného materiálu [mm]	Max. rychlost [m/min]	Asistenční plyn
TruLaser 3030	3000	1500	25	45	Dusík – N ₂

4.4 Hodnocení kvality řezu po dělení materiálu

Součástí praktické části bakalářské práce je také porovnání obou navržených technologií dělení a stanovení vhodných procesních parametrů nastavených pro výrobu typové součástí ve společnosti AŽD Praha s.r.o. Jak už bylo v úvodu práce zmíněno, technologie vysokotlakého abrazivního paprsku a laserová technologie

nepracují na společném fyzikálním principu. Řezání pomocí vodního paprsku je založeno na mechanickém úběru materiálu, kdežto dělení pomocí laseru je založené na koncentraci vysoké energie a vzniku množství tepla, v jehož důsledku dochází k tavení materiálu a následně i jeho odpařování z místa řezu. Avšak porovnání těchto technologií pro výrobu zadané součásti lze provést pouze tehdy, pokud je pro obě technologie zvolený stejný referenční bod. V tomto případě byla zvolena dosažená kvalita řezu a její hodnocení. Toto hodnocení probíhalo na základě měření tvarové a rozměrové přesnosti součásti dle výkresové dokumentace, vizuální kontroly a na základě měření vybraných parametrů drsnosti povrchu.

Tabulka 5: Porovnání vzorků z vodního paprsku a laseru

X	Vodní paprsek		Laser	
1. VZOREK				
2. VZOREK				
3. VZOREK				
4. VZOREK				
5. VZOREK				

Tabulka 6: Naměřené hodnoty kontrolních rozměrů

VZORKY VODNÍ PAPERSEK										
	Kontrolní rozměr číslo 1	Kontrolní rozměr číslo 2	Kontrolní rozměr číslo 3	Kontrolní rozměr číslo 4	Kontrolní rozměr číslo 5	Kontrolní rozměr číslo 6	Kontrolní rozměr číslo 7	Kontrolní rozměr číslo 8	Kontrolní rozměr číslo 9	Kontrolní rozměr číslo 10
Hodnota dle výkresu	37,5 ± 0,05	19,5 ± 0,1	24 ± 0,1	12 ± 0,1	7 ± 0,2	20 ± 0,1	7,5 ± 0,1	25 ± 0,1	71 ± 0,1	29 ± 0,1
Vzorek č.1	37,380 mm	19,361 mm	24,045 mm	11,992 mm	6,955 mm	19,990 mm	7,390 mm	24,984 mm	70,819 mm	29,054 mm
Vzorek č.2	37,453 mm	19,405 mm	24,031 mm	11,927 mm	6,986 mm	19,925 mm	7,406 mm	25,027 mm	70,089 mm	29,207 mm
Vzorek č.3	37,575 mm	19,657 mm	24,037 mm	11,911 mm	7,004 mm	19,926 mm	7,298 mm	25,001 mm	70,772 mm	29,127 mm
Vzorek č.4	37,479 mm	19,388 mm	24,047 mm	11,879 mm	7,023 mm	19,956 mm	7,519 mm	25,110 mm	70,782 mm	28,939 mm
Vzorek č.5	27,527 mm	19,622 mm	24,039 mm	11,817 mm	7,016 mm	19,948 mm	7,345 mm	24,921 mm	70,763 mm	29,157 mm

VZORKY TECHNOLOGIE LASER										
	Kontrolní rozměr číslo 1	Kontrolní rozměr číslo 2	Kontrolní rozměr číslo 3	Kontrolní rozměr číslo 4	Kontrolní rozměr číslo 5	Kontrolní rozměr číslo 6	Kontrolní rozměr číslo 7	Kontrolní rozměr číslo 8	Kontrolní rozměr číslo 9	Kontrolní rozměr číslo 10
Hodnota dle výkresu	37,5 ± 0,05	19,5 ± 0,1	24 ± 0,1	12 ± 0,1	7 ± 0,2	20 ± 0,1	7,5 ± 0,1	25 ± 0,1	71 ± 0,1	29 ± 0,1
Vzorek č.1	37,414 mm	19,371 mm	24,009 mm	11,965 mm	6,999 mm	20,137 mm	7,563 mm	24,973 mm	70,680 mm	28,878 mm
Vzorek č.2	37,380 mm	19,362 mm	24,046 mm	11,947 mm	6,955 mm	19,990 mm	7,390 mm	24,984 mm	70,820 mm	29,036 mm
Vzorek č.3	37,413 mm	19,387 mm	24,039 mm	11,973 mm	7,021 mm	20,118 mm	7,531 mm	24,952 mm	70,722 mm	28,888 mm
Vzorek č.4	37,420 mm	19,375 mm	24,054 mm	11,982 mm	7,039 mm	20,150 mm	7,560 mm	24,968 mm	70,725 mm	28,880 mm
Vzorek č.5										

Tabulka 7: Porovnání naměřených hodnot mezi technologiemi

NEJSHODNĚJŠÍ VZORKY										
	Kontrolní rozměr číslo 1	Kontrolní rozměr číslo 2	Kontrolní rozměr číslo 3	Kontrolní rozměr číslo 4	Kontrolní rozměr číslo 5	Kontrolní rozměr číslo 6	Kontrolní rozměr číslo 7	Kontrolní rozměr číslo 8	Kontrolní rozměr číslo 9	Kontrolní rozměr číslo 10
Hodnota dle výkresu	37,5 ± 0,05	19,5 ± 0,1	24 ± 0,1	12 ± 0,1	7 ± 0,2	20 ± 0,1	7,5 ± 0,1	25 ± 0,1	71 ± 0,1	29 ± 0,1
Vzorek č. 2 AWJ	37,453 mm	19,405 mm	24,031 mm	11,927 mm	6,986 mm	19,925 mm	7,406 mm	25,027 mm	70,089 mm	29,207 mm
Vzorek č. 2 Laser	37,380 mm	19,362 mm	24,046 mm	11,947 mm	6,955 mm	19,990 mm	7,390 mm	24,984 mm	70,820 mm	29,036 mm

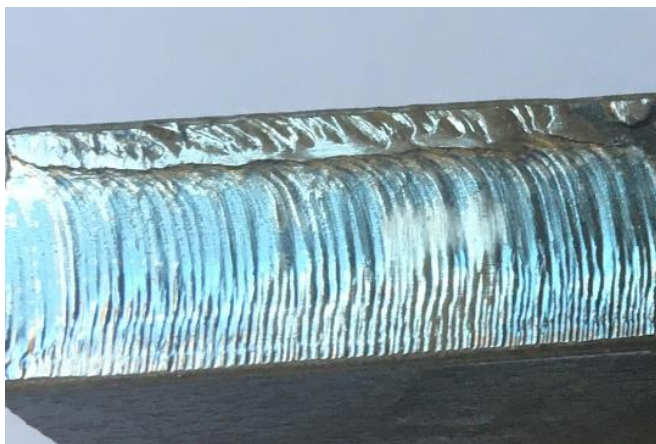
NEJNESHODNĚJŠÍ VZORKY										
	Kontrolní rozměr číslo 1	Kontrolní rozměr číslo 2	Kontrolní rozměr číslo 3	Kontrolní rozměr číslo 4	Kontrolní rozměr číslo 5	Kontrolní rozměr číslo 6	Kontrolní rozměr číslo 7	Kontrolní rozměr číslo 8	Kontrolní rozměr číslo 9	Kontrolní rozměr číslo 10
Hodnota dle výkresu	37,5 ± 0,05	19,5 ± 0,1	24 ± 0,1	12 ± 0,1	7 ± 0,2	20 ± 0,1	7,5 ± 0,1	25 ± 0,1	71 ± 0,1	29 ± 0,1
Vzorek č. 3 AWJ	37,575 mm	19,657 mm	24,037 mm	11,911 mm	7,004 mm	19,926 mm	7,298 mm	25,001 mm	70,772 mm	29,127 mm
Vzorek č. 3 Laser	37,413 mm	19,387 mm	24,039 mm	11,973 mm	7,021 mm	20,118 mm	7,531 mm	24,952 mm	70,722 mm	28,888 mm

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvíce shodných náměrů bylo dosaženo u vzorku č. 2 vyrobeného pomocí technologie vodního paprsku. U tohoto vzorku nevyhovoval kontrolní rozměr č. 9 a 10. V prvním případě se jedná o hodnotu 70,089 mm, která je o 0,811 mm menší, než je dovolená odchylka předepsaná na výkresu. V tomto případě je možné rozměr upravit a dosáhnout jmenovité rozměru. Ve druhém případě je nominální hodnota překročena o 0,107 mm. Jedná se o vzdálenost vybrání, pro kterou bude nutné potřeba upravit dělicí plán. U technologie laserového dělení se

vyskytovalo více neshod. Bylo to zřejmě zapříčiněno i tím, že je u laserové technologie složitější nalézt vhodnou kombinaci procesních parametrů a také upravit dělicí plán.

5.4.2. Vizuální hodnocení

Při vizuálním hodnocení kvality povrchu byl kontrolován výskyt a množství defektů doprovázející vznik nového povrchu po obrábění vybranými technologiemi dělení materiálu. Pro laserovou technologii dělení materiálu je typický vznik tepelně ovlivněné oblasti a přetavené vrstvy materiálu. V souladu s normou ČSN EN ISO 9013, která se zabývá hodnocením povrchu po tepelném dělení, lze na povrchu řezu identifikovat viditelné stopy po laserovém paprsku. Některé hrany, nebo jejich části byly částečně pokryty natavenou vrstvou materiálu (lesklá vrstva), která nebyla z řezné spáry odstraněna vzhledem k nízkému tlaku asistenčního plynu. Při laserovém řezání vzorků vznikala na spodní straně řezu tmavá vrstva materiálu, která byla tvořena převážně otřepy o velikosti několika milimetrů. Tyto otřepy byly z důvodu lepšího zhodnocení povrchu mechanicky odstraněny, viz obr. 25.



Obrázek 25: Ukázka kvality řezu po laserovém dělení

Při řezání vzorků pomocí technologie vodního paprsku neměl mechanický účinek abrazivních zrn takový negativní účinek na kvalitu řezu jako při laserovém řezání. Dosažená kvalita byla charakteristická tím, že horní část řezu byla poměrně hladká a od určité hloubky začínala být rýhovaná, což potvrzuje přítomnost skluzů. Ke vzniku skluzu došlo vychýlením paprsku a při poklesu jeho kinetické energie. Velký vliv na tvorbu

skluzu měla také vyšší posuvová rychlost. Při průchodu paprsku materiálem došlo také ke změně mechanismu úběru, a to z řezného opotřebení na deformační opotřebení viz obr. 26. Geometrickou specifikací a kvalitou výrobků se v tomto případě zabývá norma s označením SN 214001 – Bezkontaktní řezání – vodní paprsek. Tato norma definuje parametry, pomocí nichž jsou hodnocené povrchy přiřazeny k jednotlivým stupňům kvality povrchu Q1 – dělicí řez, Q5 – nejvyšší kvalita řezu. I tak byl povrchu po technologii vodního paprsku hladší, bez otřepů a po vizuální stránce dosáhl vyšší kvality než laserem řezané plochy. Částečnou nevýhodou dělení vodním paprskem byly velmi ostré hrany a přechody, které bude pro další použití součásti nutné mechanicky upravit.



Obrázek 26: Ukázka kvality řezu po dělení vodním paprskem

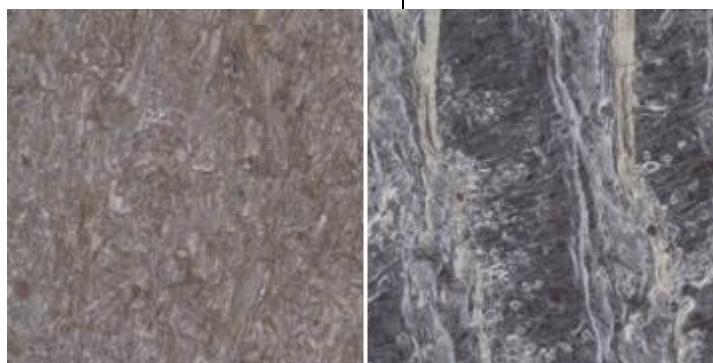
5.4.3. Měření drsnosti povrchu

Při hodnocení kvality povrchu je nutné vzít v potaz, jakým způsobem a parametry byl povrch vyroben. Každá technologie zanechává charakteristickou texturu, která ovlivňuje funkčnost povrchu. Může se například jednat o odolnost vůči opotřebení, únavové vlastnosti, odolnost proti korozi apod. Pro co nejpřesnější určení kvality povrchu po procesu dělení materiálu bylo nutné zvolit správnou metodu měření a vybrat sledované parametry. Již v teoretické části práce bylo zmíněno, že kvalitu povrchu po tepelném, nebo mechanickém dělení, lze definovat parametrem Ra , tedy průměrnou aritmetickou úchylkou profilu. I přestože se pro tuto strukturu povrchu jeví parametry plošné drsnosti Sa , Sz jako více vypovídající, budou profilové parametry

dostačující pro posouzení profilu obou povrchů. Parametr Ra je také určený normou SN 2144001 definující množství parametrů, pomocí kterých lze kvantifikovat jednotlivé stupně kvality Q . Měření parametru Ra probíhalo v laboratorních podmínkách Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie na optickém systému Alicona Infinite Focus G5 od společnosti Bruker Alicona. Pro měření byl použit objektiv s označením 10x a filtr profilu λc dle ČSN EN ISO 4287.

Drsnost povrchu byla měřena v jednotlivých zónách řezu, a to v hladké, přechodové a rýhované zóně viz obr. 9. Dohromady tak byly na vyřezaných vzorcích proměřeny tři různá místa, přičemž vzniklo 9 na sobě nezávislých měření, viz. tabulka níže.

Technologie laseru			Technologie vodního paprsku		
Vzorek č. 1; parametr Ra (μm)			Vzorek č. 1; parametr Ra (μm)		
A1 - 1,805	B1 - 1,671	C1 - 1,604	A1 - 1,786	B1 - 1,708	C1 - 1,884
A2 - 1,095	B2 - 1,132	C2 - 2,444	A2 - 1,793	B2 - 1,772	C2 - 1,639
A3 - 4,980	B3 - 7,128	C3 - 5,034	A3 - 1,622	B3 - 1,963	C3 - 1,415
Vzorek č. 2; parametr Ra (μm)			Vzorek č. 2; parametr Ra (μm)		
A1 - 1,239	B1 - 1,080	C1 - 0,916	A1 - 1,872	B1 - 1,832	C1 - 1,747
A2 - 1,224	B2 - 0,945	C2 - 1,182	A2 - 2,066	B2 - 1,732	C2 - 1,683
A3 - 5,057	B3 - 4,704	C3 - 7,481	A3 - 2,174	B3 - 1,837	C3 - 1,832
Vzorek č. 3; parametr Ra (μm)			Vzorek č. 3; parametr Ra (μm)		
A1 - 1,590	B1 - 2,172	C1 - 2,980	A1 - 1,938	B1 - 2,003	C1 - 2,072
A2 - 1,224	B2 - 1,311	C2 - 2,010	A2 - 2,219	B2 - 1,967	C2 - 1,916
A3 - 5,070	B3 - 4,192	C3 - 4,200	A3 - 2,260	B3 - 1,840	C3 - 1,887
Vzorek č. 4; parametr Ra (μm)			Vzorek č. 4; parametr Ra (μm)		
A1 - 1,989	B1 - 1,264	C1 - 1,769	A1 - 2,056	B1 - 2,407	C1 - 2,074
A2 - 2,330	B2 - 2,246	C2 - 2,494	A2 - 2,185	B2 - 1,897	C2 - 1,862
A3 - 5,037	B3 - 4,993	C3 - 9,089	A3 - 1,926	B3 - 2,043	C3 - 1,677
			Vzorek č. 5; parametr Ra (μm)		
			A1 - 2,482	B1 - 3,091	C1 - 2,409
			A2 - 2,005	B2 - 2,246	C2 - 1,970
			A3 - 2,119	B3 - 1,673	C3 - 2,105



Obrázek 27: Detail povrchu po řezání vodním paprskem a laserem

4.5 Technicko-ekonomické zhodnocení

Technickoekonomické zhodnocení stávající výroby součástí a nově navržených postupů bylo provedeno na základě porovnání hodinové sazby strojů, výrobního času a dosažené kvality. Je nutné si uvědomit, že stávající výroba součástí probíhala v několika krocích, které je však nutné zahrnout pro zhodnocení jako celek. Tedy od přichystání polotovaru až po finální opracování součástí zahrnující několik na sebe navazujících výrobních operací. Jelikož pomocí nově navržených technologií a postupů dochází k výrobě součástí přímo ze surového materiálu a odpadnutí několika výrobních kroků, předpokládá se při její výrobě vyšší časová úspora. Na zkrácení času výroby součástí pomocí navržených technologií se budou příznivě podílet také navržené parametry řezání. Například s rostoucí řeznou (posuvovou) rychlostí se bude úměrně zkracovat doba potřebná na výrobu součástí. To obvykle přináší vyšší produktivitu práce a také ekonomické přínosy. Avšak při technickoekonomickém zhodnocení je nutné vzít v potaz také negativní vliv vyšší řezné (posuvové) rychlosti na kvalitu řezu. Se zvyšující se hodnotou řezné rychlosti dochází ke zhoršení kvality povrchu. Proto je nutné provést technickoekonomické zhodnocení výroby součástí také s ohledem na dosaženou kvalitu.

5 Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývala výrobou typové součásti z produktového portfolia společnosti AŽD Praha s.r.o. Tato společnost se už delší dobu zabývá strojírenskou výrobou, kdy je z důvodu vysoké konkurenceschopnosti a požadavků trhu nucena neustále inovovat svoje stávající výrobní procesy. Cílem práce tedy bylo navrhnout novou technologii výroby za účelem dosažení vyšší produktivity práce

a dosažení požadované kvality opracování.

S ohledem na typ a tvarové dispozice byla pro opracování součásti navržena technologie vysokotlakého abrazivního vodního paprsku a laserová technologie. Tyto dvě metody patří díky principu, při kterém dochází k úběru materiálu, mezi progresivní nekonvenční technologie, které mají oproti běžným způsobům opracování řadu výhod. Mezi nejzásadnější patří opracování téměř všech druhů materiálů bez ohledu na jejich mechanické a fyzikální vlastnosti, vysoká produktivita a kvalita opracování, ekologická nezávadnost.

Při návrhu nové technologie výroby se vycházelo ze stávajícího způsobu výroby a také z požadavků na dodržení funkčnosti součásti. Pro jednotlivé technologie byly navrženy procesní parametry tak, aby byly při opracování splněny požadavky na vysokou kvalitu upracování a zároveň zkrátily dobu opracování oproti předchozímu způsobu výroby. Stanovení vhodnosti navržené technologie a procesních parametrů bylo realizováno na základě hodnocení kvality vyrobených vzorků a technickoekonomickém hodnocení. Na vzorcích řezaných pomocí laseru a vodního paprsku se hodnotila tvarová a rozměrová přesnost, stav povrchu řezné spáry a výskyt vad po dělení materiálu, drsnost povrchu po řezání. S ohledem na tvarovou a rozměrovou přesnost vyrobených vzorků, bylo u obou technologií dosaženo velmi podobných hodnot. Některé z naměřených hodnot byly mimo toleranci, avšak vhodnou úpravu programu nebo dělicího plánu lze docílit požadovaných hodnot. Při vizuálním hodnocení kvality povrchu bylo zjištěno, že povrch po řezáním vodním paprskem nejevil známky velkého

poškození. Byl téměř po celé šířce hladký, avšak v závislosti na hloubce řezu a rychlosti řezání se na povrchu objevily stopy po paprsku. Při řezání součástí pomocí technologie laseru docházelo vlivem vysoké teploty v místě řezu ke vzniku nataveného materiálu. Ten byl pomocí asistenčního plynu vyfukován z místa řezu a ulpíval na spodní straně ve formě otřepů. Avšak vlivem vyšší řezné (posuvové) rychlosti docházelo ke zhoršení kvality povrchu řezné spáry tím, že se natavený materiál z místa řezu nestačil odstranit a ulpíval na stěnách řezné spáry. Vyšší řezná rychlost měla také vliv na vznik a větší viditelnost stop po laserovém paprsku. Tyto negativní jevy doprovázející vznik nového povrchu při dělení materiálu měly také zásadní vliv na dosaženou drsnost povrchu. Parametr Ra byl z tohoto důvodu měřen ve třech zónách tak, aby byl zohledněn vliv rostoucí tloušťky materiálu. Lepších výsledků bylo dosaženo při řezání pomocí technologie vodního paprsku, čímž se potvrdily i předpoklady uvedené v teoretické části práce.

Na druhou stranu se technologie laseru ukázala při řezání jako velice produktivní. Výrobní čas jedné součásti byl desetkrát nižší než u technologie vodního paprsku. Toto se pozitivně projevilo také na ceně výroby jednoho kusu. Lze tedy konstatovat, že technologie laseru sebou přináší nespornou výhodu především v produktivitě práce. Tímto bylo naplněno i očekávání společnosti AŽD Praha s.r.o., protože stávající způsob výroby součásti byl značně zdoluhavý, a tedy neproduktivní. I přesto, že technologie vodního paprsku dosáhla velmi dobrých výsledků a má nespočet výhod oproti laseru, jeho použití s ohledem na požadavky kladené na zvolenou součást by v tomto případě nebylo vhodné.

6 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Technologie vodního paprsku	16
Obrázek 2: Jednotlivé části zařízení a jejich zapojení	19
Obrázek 3: Multiplikátor a jeho schéma	20
Obrázek 4: Vysokotlaké potrubí	21
Obrázek 5: Řezací hlava DWJ	22
Obrázek 6: Ukázka abrazivních trysek	23
Obrázek 7: Ukázka abrazivního média - Australský granát	24
Obrázek 8: Řez vodním paprskem	25
Obrázek 9: Ukázka základních zón povrchu po řezání technologií AWJ	26
Obrázek 10: Ukázka kvalitativních stupňů při řezání vodním paprskem	27
Obrázek 11: Vliv parametrů řezání technologií AWJ na kvalitu řezu	29
Obrázek 12: Technologie laserového řezání	32
Obrázek 13: Princip stimulované emise záření	33
Obrázek 14: Princip prvního laserového zařízení	34
Obrázek 15: Rozdíly aktivního prostředí	35
Obrázek 16: Konstrukce laseru a jeho základní části	36
Obrázek 17: Schéma řezání svazkem laseru	37
Obrázek 18: Struktura povrchu po laserovém řezání	38
Obrázek 19: Jednoduchý výměnový zámek	42
Obrázek 20: Ukázka jednotlivých operací výroby u zásuvky 04006-0-008	43
Obrázek 21: Schéma navržené experimentální činnosti	45
Obrázek 22: Stroj pro řezání vodním paprskem Mach 3b-4020b, Edition 35 od společnosti Flow s.r.o.	46
Obrázek 23: Laserový řezací systém TruLaser 3030 od společnosti Trumpf	48
Obrázek 24: Kontrolované rozměry, označení na výkrese	50
Obrázek 25: Ukázka kvality řezu po laserovém dělení	52
Obrázek 26: Ukázka kvality řezu po dělení vodním paprskem	53
Obrázek 27: Detail povrchu po řezání vodním paprskem a laserem	54

7 Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Hodnocení kvality dle výrobců a dodavatelů technologie vodního paprsku	27
Tabulka 2: Bližší informace o materiálu uvedené v materiálovém listu	44
Tabulka 3: Technické parametry stroje a použitého abrazivního média:	47
Tabulka 4: Technické parametry laserového str	48
Tabulka 5: Porovnání vzorků z vodního paprsku a laseru	49
Tabulka 6: Naměřené hodnoty kontrolních rozměrů	51
Tabulka 7: Porovnání naměřených hodnot mezi technologiemi	51

8 Literatura

1. ALSOUFI M. A., SUKER D. K., ALSABBAN A. S., AZAM S. *Experimental Study of Surface Roughness and Micro-Hardness Obtained by Cutting Carbon Steel with Abrasive WaterJet and Laser Beam Technologies*. In: article.scimechanicalengineering.com [online]. 2016 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: http://article.scimechanicalengineering.com/pdf/AJME-4-5-2.pdf?fbclid=IwAR2AWfNbvAEQB4fzc4y_HX67PAzyW78hGQG8Gwjrs9t165sj6q4WO4TBL0k
2. BENKO, B., et al. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity. 2000 Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
3. BRYM, R. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem*. In: vutbr.cz [online]. 2008 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5167&fbclid=IwAR0S_Q8r2I43EoUFZsSAFg4CVYPAFoAl-oVV5rd88HRwT4DEUgKm9vpEruI
4. BODNÁROVÁ, L. *intersekcce vysokotlakého paprsku a betonu*. Brno, 2001. Disertační práce. VUT FAST Brno.
5. CICCUCU, R. *Water jet in rock and mineral engineering. University of Cagliari*. In: udec.cl[online]. [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: http://www2.udec.cl/alfatl/alfateclimin/documentos/cd_Arequipa/arequipa.pdf
6. CEZ.CZ, *Objev a objevitelé – cesta k objevu*. In: CEZ.CZ [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
7. Cncdelfin.cz, *Řezání vodním paprskem*. In: cncdelfin.cz [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://www.cncdelfin.cz/cnc-technologie/tabulka-drsnosti>
8. DVORSKÝ, R., SITEK, L., SOCHOR, T. Pulsed liquid jet generated by pulse multiplication technique. In: Sitek, L. et al.: *Water Jet 2013 – Research, Development, Applications*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., 2013, pp. 25-45.
9. Dvořáková J., Dvořák, J. *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II*. In: glassrevue.com [online]. 2008 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>
10. FLOW WATERJET. *Jak funguje vodní paprsek*. In: flowwaterjet.cz [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Jak-funguje-vodni-paprsek.aspx#pure>
11. FLOW WATERJET. Světově nejrozšířenější stroj na řezání vodním paprskem. In: flowwaterjet.cz [online]. Mach 3b [cit. 2020-05-14]. Dostupné z:

- <https://www.flowwaterjet.com/FlowWaterjet/media/Flow/8 Footer/Resources/Downloads/Brochures/Mach%203/Mach-3b-Brochure A4 CZ.pdf>
12. FOLDYNA, Josef. *Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti?* In: vesmir.cz [online]. 2013-12-05 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2013/cislo-12/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti.html?fbclid=IwAR2BHkkw8X5BrMNsWi7csIR0-T-m-x-1GM-GAjaPOEt4dSe0U-ltZ2E5uqM>.
 13. GOKHAN, A., *Performance of recycling abrasives in rock cutting by abrasive water jet*. In: link.springer.com [online]. 2015-03-13 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-015-2616-5>
 14. HASSAN, A. I., CHEN, C., KOVACEVIC, R. *Online monitoring of depth of cut in AWJ cutting*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, 2004, pp. 595–605, ISSN 0890-6955.
 15. HLAVÁČEK, P. *Studium topografie povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením ve vztahu k fyzikálně-mechanickým vlastnostem materiálů*. Disertační práce. Ostrava, 2012
 16. HLOCH S., SRIVASTAVA, M., NAG A., aj., *Effect of pressure of pulsating water jet moving along stair trajectory on erosion depth, surface morphology and microhardness* In: scopus.com.com [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85083324574&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=hloch&st2=&sid=171e73a980f59c6b330dc702a87ec3b1&sot=b&sdt=b&sl=18&s=AUTHOR-NAME%28hloch%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm=>
 17. HLOCH, S., VALÍČEK, J.: *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazivným delením*, Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií, 2008, ISBN 978-80-553-0091-7
 18. HÍREŠ, O., HATALA, M., HLOCH, S., *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. In: Sergej Hloch. 2007, 147 s. ISBN 978-8-0-8073-6682
 19. CHUDÁČEK, Václav, POUPĚ, Oldřich, ed. *Zabezpečovací technika v železniční dopravě: učebnice pro vysoké školy*. Praha: Nadas, 1972.
 20. ELNASERVIS.CZ *Princip řezání vodním paprskem*. In: elnaservis.cz [online]. [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: http://www.elnaservis.cz/rezani-vodnim-paprskem.html?fbclid=IwAR160ASxheRO2nuVaBn2y_hMKMf4w7rHsRi4QO992Ib4tR-G9Lvpaezmmpw
 21. KCCONTROLS. *High pressure tubing*. In: kcccontrols.uk [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://kcccontrols.co.uk/product/high-pressure-tubing/?fbclid=IwAR2XnsMZmk1TyiEIAxzhcoZcETWzUTrNPJQ0ilmvnIKzfAjzUj7O-iZlFU>

22. KOŘÁN, Pavel. *Lasery a Optika*. In: lao.cz [online]. 2013-02-19 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
23. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi – WJM*. Bratislava: 1998. ISBN 80-8057-091-4
24. LAO.CZ, *Seriál na téma lasery – základní princip laseru a jejich dělení*. In: lao.cz [online]. 2011-03-15 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
25. LASCAM.CZ. *Rozdělení laserů*. In: lascum.cz [online]. 2015-08-02 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
26. Laserart.wbs.cz, *Historie laseru*. In: laserart.wbs.cz [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html
27. MM SPEKTRUM. *Nekonvenční metody obrábění*. In: mmspektrum.com [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html?fbclid=IwAR0G3qer18ADowZVDgrwiGxgBIkcES_ikmw2LdlX7iS41c0axjZIxaczMJs
28. MM SPEKTRUM. *Co rozhoduje při volbě typu laseru*. 2011-07-09 In: mmspektrum.com [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html?fbclid=IwAR3_d8zaie8FVEWCnd-RZrsLy0D2xq2MfCzJmSJISAAzXj7YICYj3wKgNsk
29. MM SPEKTRUM. *Technologie opracování laserem*. 2010-10-20. In: mmspektrum.com [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technologie-opracovani-laserem.html?fbclid=IwAR3mrjot_Ky6XsXd0gmNO7tgx2wS8YnNf0aR2KJQP D5 L1rALWhWuMZymSmU
30. MM SPEKTRUM. *Vodní parsek s CNC řízením*. 2014-11-13. In: mmspektrum.com [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vodni-paprsek-s-cnc-rizenim.html>
31. MM Průmyslové spektrum. Praha: Vogel Publishing, 1997-. ISSN issn1212-2572.
32. MOMBER, W.A., KOVACEVIC, R. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. In: *Springer Science & Business Media*, 2012, Technology & Engineering, 394 s. ISBN 978-1-4471-1574-8.
33. Mve.energetika.cz. *Plunžrové čerpadlo. 2020* In: mve.energetika.cz [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://mve.energetika.cz/jineturbiny/plunzrove-cerpadlo.htm>
34. PISKOVACKA.CZ. *Přírodní granát – pískovací abrazivo (využití a jeho hlavní výhody)*. 2019-02-13 In: piskovacka.cz [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z:

- https://www.piskovacka.cz/prirodni-granat-abrazivo/?fbclid=IwAR0xD3db7AxFPq7zEbEYHGUELkh86Ntt0gPuxWc6laWsa_yNjKmjIwrvG0M.
35. PTV.CZ *Diamantová řezací hlava SLICE II*. In: PTV.CZ [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: [http://www.ptv.cz/diamantova-rezaci-hlava-slice-0/?fbclid=IwAR3OcR47UV08x2xTkmEJ-ReWoo - Ajpl_bi6why1Ln5o3PQic1ad0VpBrAY](http://www.ptv.cz/diamantova-rezaci-hlava-slice-0/?fbclid=IwAR3OcR47UV08x2xTkmEJ-ReWoo-Ajpl_bi6why1Ln5o3PQic1ad0VpBrAY)
 36. OPTICLABS, *Laser design* In: opticlabs.ca/laser-design [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.opticlabs.ca/laser-design/?fbclid=IwAR0OG0wvVuXZE5LTNMgyGpUTQGqyO6wAg2tx00p40Tvxw4ZZ0iWo6s5sZyU>
 37. ŘASA, J.; JINDROVÁ, R. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem*. MM Průmyslové spektrum. 2006, ISSN 1212-2572
 38. REZANI-CNC.CZ. *Princip řezání vodním paprskem*. In: rezani-cnc.cz [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>
 39. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
 40. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.
 41. SN 214001. Contact-free cutting – Water jet cutting – Geometrical product specification and quality. Schweizerische Normen-Vereinigung, 2010, 16 s.
 42. SUMMERS, D.A. *Waterjetting Technology*. Oxford, 1995, 882s. ISBN 978-0419196600.
 43. trumpf.com *Tru laser 3030* In: trumpf [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/2d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-30303040/
 44. VAN LUTTERVELT, C. A., CHILDS, T.H.C., JAWAHIR, I.S., KLOCKE, F., PATRI K. V., *Present Situation and Future Trends in Modeling of Machining Operations*. CIRP. 1998. pp.587-626.
 45. VASILKO, Karol. *Nové materiály a technológie ich spracovania*. Bratislava: Alfa, 1990. Edícia strojárскеj literatúry. ISBN 80-05-00661-6.
 46. VASILKO, Karol, HRUBÝ, Jindřich, LIPTÁK, Ján. *Technológia obrábania a montáže*. Bratislava: Alfa, 1991. ISBN 80-05-00807-4.
 47. VALÍČEK, Jan, HLOCH, Sergej. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava: Ámos, 2008. ISBN 978-80-254-3588-5.
 48. VESMÍR *Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti? 2013-12-05* In: vesmir.cz [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2013/cislo-12/pulzujici-vodni-paprsek-technologie->

- [budoucnosti.html?fbclid=IwAR2BHkkw8X5BrMNsWi7cslR0-T-m-x-1GM-GAjaPOEt4dSe0U-ltZ2E5uqM](#)
49. Journal of engineering for industry: Transactions of the ASME. New York: American Society of Mechanical Engineers. ISSN 0022-0817.
50. Vodnipaprsek.com, *Řezání vodním paprskem od historie po současnost*. In: vodnipaprsek.com [online]. [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://www.vodnipaprsek.com/o-vodnim-paprsku/>
51. WARDJET.COM. *High pressure waterjet cutting*. In: wardjet.com [online]. [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://wardjet.com/waterjet/university/pumps?fbclid=IwAR0em3PljoQYorVcvco9xEWEnCAU9aEoFBU9FSGFN9dMJqt1Fw8fEgDPMA>
52. ZADANI-SEMINARKY.CZ *Moderní technologie – Obráběním vodním paprskem* In: zadani-seminarky.cz [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: https://www.zadani-seminarky.cz/seminarni-prace/moderni-technologie-obrabeni-vodnim-paprskem/10167?fbclid=IwAR0XSb6Tn6CsdP9P1MplD5nuJR5L-oJ_AoZDBBSzx_8ISjdwVXkRnk8vPWc

